



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

ANALISA STABILITAS SUDUT ROTOR PADA JARINGAN DISTRIBUSI KOTA PAYAKUMBUH YANG TERHUBUNG DISTRIBUTED GENERATOR

Andika Bagaskara
NRP 07111440000100

Dosen Pembimbing
Prof.Ir.Ontoseno Penangsang,M.Sc,Ph.D
Dr.Ir.Soedibyo, M.MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - EE 184801

**ANALISA STABILITAS SUDUT ROTOR PADA JARINGAN
DISTRIBUSI KOTA PAYAKUMBUH YANG TERHUBUNG
DISTRIBUTED GENERATOR**

**Andika Bagaskara
NRP 07111440000100**

**Dosen Pembimbing
Prof.Ir.Ontoseno Penangsang,M.Sc,Ph.D
Dr.Ir.Soedibyo, M.MT**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - EE 184801

**ROTOR ANGLE STABILITY ANALYSIS ON
DISTRIBUTION NETWORK PAYAKUMBUH CITY
CONNECTED WITH DISTRIBUTED GENERATOR**

Andika Bagaskara
NRP 07111440000100

Supervisors
Prof.Ir.Ontoseno Penangsang,M.Sc,Ph.D
Dr.Ir.Soedibyo, M.MT

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

ANALISA STABILITAS SUDUT ROTOR PADA JARINGAN DISTRIBUSI KOTA PAYAKUMBUH YANG TERHUBUNG DISTRIBUTED GENERATOR

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada


Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
NIP. 194907151974121007


Dr. Ir. Soedibyo, M.MT
NIP. 195512071980031004



**SURABAYA
OKTOBER, 2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“ANALISA KESTABILAN SUDUT ROTOR PADA JARINGAN DISTRIBUSI KOTA PAYAKUMBUH YANG TERHUBUNG DISTRIBUTED GENERATOR”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Oktober 2018

Andika Bagaskara
07111440000100

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISA STABILITAS SUDUT ROTOR PADA JARINGAN DISTRIBUSI KOTA PAYAKUMBUH YANG TERHUBUNG DISTRIBUTED GENERATOR

Nama mahasiswa : Andika Bagaskara

Dosen Pembimbing I : Prof.Ir.Ontoseno Penangsang,M.Sc,Ph.D

Dosen Pembimbing II : Dr.Ir.Soedibyo, M.MT

Abstrak:

Pada era sekarang ini, penggunaan DG sebagai sistem kelistrikan yang baru sangatlah bermanfaat. Pengembangan sistem kelistrikan kota Payakumbuh pada era sekarang sangatlah dibutuhkan. Dikarenakan kota Payakumbuh semakin maju sehingga membutuhkan sistem kelistrikan yang mandiri dengan terhubung Distributed Generator. Akan tetapi, demi mendukung kelayakan dari perencanaan sistem kelistrikan yang baru dibutuhkanlah suatu analisa yang dapat membuktikan apakah sistem kelistrikan yang baru ini layak digunakan. Dalam pengerjaan tugas akhir ini melakukan simulasi mengenai kestabilan sudut rotor jaringan distribusi kota Payakumbuh penyulang Koto Nan 4. Dalam analisa kestabilan sudut rotor, parameter *Critical Clearing Time* (CCT) sebagai indikator dari performa sistem. Akan disimulasikan dengan memberikan sebuah gangguan pada bus dan akan dianalisa waktu ketika dalam keadaan stabil menuju tidak stabil.

Kata kunci: Distributed Generation, Kestabilan transien, Kestabilan Sudut Rotor, Critical Clearing Time

Halaman ini sengaja dikosongkan

ROTOR ANGLE STABILITY ANALYSIS ON DISTRIBUTION NETWORK PAYAKUMBUH CITY CONNECTED WITH DISTRIBUTED GENERATOR

Student Name : Andika Bagaskara
Supervisor I : Prof.Ir.Ontoseno Penangsang,M.Sc,Ph.D
Supervisor II : Dr.Ir.Soedibyo, M.MT

Abstract:

In the current era, the use of DG as a new electrical system is very useful. Development of electricity system Payakumbuh city in the present era is needed. Due to the increasingly advanced Payakumbuh city that requires an independent electrical system with a Distributed Generator connected. However, to support the feasibility of planning a new electrical system requires an analysis that can prove whether the new electrical system is feasible to use. In this final project, simulated about the stability of the rotor angle of Payakumbuh city distribution network feeder Koto Nan 4. In stability analysis of rotor angle, Critical Clearing Time parameter (CCT) as an indicator of system performance. It will be simulated by providing a noise on the bus and will be analyzed when it is stable to unstable.

Key Word: Distributed Generation, Transient Stability,Rotor Angle Stability,Critical Clearing Time

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Analisa Stabilitas Sudut Rotor pada Jaringan Distribusi Kota Payakumbuh yang Terhubung Distributed Generator**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ayah, Bunda dan Adik-adik penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, PhD dan Dr.Ir.Soedibyo, M.MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Pinnanggih Rahayu selaku rekan sejawat dalam pengerjaan tugas akhir mengenai tema transien.
6. Kepada Adel, Reno, Avino, Reyneta, dan Muthia selaku sahabat yang selalu memberikan semangat dan perhatian dalam pengerjaan tugas akhir ini.
7. Anggota dari IMAMI (Ikatan Mahasiswa Minang) yang senantiasa bersama dalam menyelesaikan masalah yang ada di organisasi.
8. Sahabat KONS yang selalu memberikan motivasi yang membangun agar saya mengerjakan tugas akhir ini dengan baik.
9. Adik Yogi Prianda selaku junior yang senantiasa mengingatkan penulis apabila dalam pengerjaan tugas akhir sering bermalas-malasan.

10. Nabila Gusta Az Zahra yang selalu mengingatkan serta memberikan semangat kepada penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini.
11. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.
12. Para elemen masyarakat yang senantiasa mendukung saya dalam pengerjaan tugas akhir.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Oktober 2018

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1. Studi Literatur.....	3
2. Pengumpulan Data.....	4
3. Pemodelan Sistem.....	4
4. Simulasi dan Analisa Data.....	4
5. Kesimpulan	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	7
2.1.1 Jaringan Distribusi Radial	7
2.1.2 Sistem Distribusi Aktif.....	8
2.1.3 Keuntungan dan kerugian sistem distribusi radial.....	8
2.2 Distributed Generation	8
2.1.4 Keuntungan dari Distributed Generation.....	10
2.3 Analisis Aliran Daya	11
2.3.1 Analisis Aliran Daya <i>Topology Network</i>	12

2.3.2	Analisis Aliran Daya Aktif	14
2.4	Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	15
2.4.1	Kestabilan Sudut Rotor	17
2.5	Analisis Stabilitas Transien berdasarkan Pemodelan Sistem	18
2.6	Penentuan Lokasi DG Berdasarkan Metode Analitik	21
2.7	Persamaan Ayunan	22
2.8	Metode Critical Trajectory.....	24
2.9	Critical Clearing Time	24
2.10	Metode Reduksi Kron.....	25
2.11	Metode <i>Runge-kutta</i> Orde 4.....	26
BAB 3 PERANCANGAN DAN PEMODELAN SISTEM.....		29
3.1	Sistem Distribusi PLN Kota Payakumbuh.....	29
3.1.1	Sistem Kelistrikan Penyulang Koto Nan 4.....	29
3.2	Data Pembangkitan	32
3.1.2	<i>Power Grid</i> (GH Payakumbuh PLN).....	32
3.1.3	Distributed Generation.....	34
3.3	Diagram Alir Simulasi Kestabilan Sudut Rotor Penyulang Koto Nan 4.....	37
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS.....		39
4.1	Pemodelan Simulasi Sistem Kelistrikan PLN Payakumbuh	39
4.2	Penentuan Lokasi DG	40
4.3	Hasil Simulasi Kestabilan Sudut Rotor.....	41
4.3.1	Terhubung dengan 1 DG.....	41
4.3.2	Terhubung dengan 2 DG.....	48
BAB 5 KESIMPULAN		57
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran	57
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN		61

BIODATA PENULIS63

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Distribusi Radial Sederhana	7
Gambar 2.2 Contoh single line diagram radial.....	12
Gambar 2.3 Ilustrasi pemodelan negatif PQ bus	15
Gambar 2.4 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga	16
Gambar 2.5 Pemodelan Generator	19
Gambar 2.6 Pemodelan <i>PhotoVoltaic</i>	20
Gambar 2.7 Representasi suatu rotor pada (a) Generator	23
Gambar 2.7 Representasi suatu rotor pada (b) Motor	23
Gambar 2.8 Ilustrasi kondisi stabil dan tidak stabil	23
Gambar 3.1 Single Line Diagram Penyulang Koto Nan 4	30
Gambar 4.1 Trajektori Generator 1 Case A 45%	42
Gambar 4.2 Trajektori Generator 1 Case B 45%	42
Gambar 4.3 Trajektori Generator 1 Case C 45%	42
Gambar 4.4 Trajektori Generator 1 Case D 45%	42
Gambar 4.5 Trajektori Generator 1 Case E 45%	43
Gambar 4.6 Trajektori Generator 2 Case A 45%	43
Gambar 4.7 Trajektori Generator 1 Case B 45%	43
Gambar 4.8 Trajektori Generator 2 Case C 45%	43
Gambar 4.9 Trajektori Generator 2 Case D 45%	43
Gambar 4.10 Trajektori Generator 2 Case E 45%	44
Gambar 4.11 Sudut Rotor Generator Case A 45%	44
Gambar 4.12 Sudut Rotor Generator Case B 45%	44
Gambar 4.13 Sudut Rotor Generator Case D 45%	44
Gambar 4.14 Sudut Rotor Generator Case E 45%	44
Gambar 4.15 Sudut Rotor Generator Case E 45%	45
Gambar 4.16 Trajektori Generator 1 Case A 32%	45
Gambar 4.17 Trajektori Generator 1 Case B 32%	45
Gambar 4.18 Trajektori Generator 1 Case C 32%	46
Gambar 4.19 Trajektori Generator 1 Case D 32%	46
Gambar 4.20 Trajektori Generator 1 Case E 32%	46
Gambar 4.21 Trajektori Generator 2 Case A 32%	46
Gambar 4.22 Trajektori Generator 2 Case B 32%	46
Gambar 4.23 Trajektori Generator 2 Case C 32%	47
Gambar 4.24 Trajektori Generator 2 Case D 32%	47

Gambar 4.25 Trajektori Generator 2 Case E 32%	47
Gambar 4.26 Sudut Rotor Generator Case A 32%	47
Gambar 4.27 Sudut Rotor Generator Case B 32%	47
Gambar 4.28 Sudut Rotor Generator Case C 32%	48
Gambar 4.29 Sudut Rotor Generator Case D 32%	48
Gambar 4.30 Sudut Rotor Generator Case E 32%	48
Gambar 4.31 Trajektori Generator 1 Case A 45% 2 DG	49
Gambar 4.32 Trajektori Generator 1 Case B 45% 2 DG.....	49
Gambar 4.33 Trajektori Generator 1 Case C 45% 2 DG.....	49
Gambar 4.34 Trajektori Generator 1 Case D 45% 2 DG.....	49
Gambar 4.35 Trajektori Generator 1 Case E 45% 2 DG.....	50
Gambar 4.36 Trajektori Generator 2 Case A 45% 2 DG.....	50
Gambar 4.37 Trajektori Generator 2 Case B 45% 2 DG.....	50
Gambar 4.38 Trajektori Generator 2 Case C 45% 2 DG.....	50
Gambar 4.39 Trajektori Generator 2 Case D 45% 2 DG.....	50
Gambar 4.40 Trajektori Generator 2 Case E 45% 2 DG.....	51
Gambar 4.41 Sudut Rotor Generator Case A 45% 2 DG.....	51
Gambar 4.42 Sudut Rotor Generator Case B 45% 2 DG.....	51
Gambar 4.43 Sudut Rotor Generator Case C 45% 2 DG.....	51
Gambar 4.44 Sudut Rotor Generator Case D 45% 2 DG.....	51
Gambar 4.45 Sudut Rotor Generator Case D 45% 2 DG.....	52
Gambar 4.46 Trajektori Generator 1 Case A 32% 2 DG.....	52
Gambar 4.47 Trajektori Generator 1 Case B 32% 2 DG.....	52
Gambar 4.48 Trajektori Generator 1 Case C 32% 2 DG.....	53
Gambar 4.49 Trajektori Generator 1 Case D 32% 2 DG.....	53
Gambar 4.50 Trajektori Generator 1 Case E 32% 2 DG.....	53
Gambar 4.51 Trajektori Generator 2 Case A 32% 2 DG.....	53
Gambar 4.52 Trajektori Generator 2 Case B 32% 2 DG.....	53
Gambar 4.53 Trajektori Generator 2 Case C 32% 2 DG.....	54
Gambar 4.54 Trajektori Generator 2 Case D 32% 2 DG.....	54
Gambar 4.55 Trajektori Generator 2 Case E 32% 2 DG.....	54
Gambar 4.56 Sudut Rotor Generator Case A 32% 2 DG.....	54
Gambar 4.57 Sudut Rotor Generator Case B 32% 2 DG.....	54
Gambar 4.58 Sudut Rotor Generator Case C 32% 2 DG.....	55
Gambar 4.59 Sudut Rotor Generator Case D 32% 2 DG.....	55
Gambar 4.60 Sudut Rotor Generator Case E 32% 2 DG	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkitan.....	9
Tabel 2.2 Tipe DG berdasarkan kapasitas teknologi [4]	10
Tabel 3.1 Data Sistem Kelistrikan Feeder Koto Nan 4	31
Tabel 3.2 Spesifikasi Generator Utama.....	33
Tabel 3.3 Spesifikasi <i>Distributed Generation</i>	34
Tabel 3.4 Skenario Level Pembangkitan DG	35
Tabel 3.5 Kelebihan dan Kekurangan Generator Diesel	35
Tabel 3.6 Kelebihan dan Kekurangan <i>PhotoVoltaic</i>	36
Tabel 4.1 Prioritas Pemasangan DG 45%	40
Tabel 4.2 Prioritas Pemasangan DG 32%	41
Tabel 4.3 Hasil CCT dengan pemasangan 1 DG.....	42
Tabel 4.4 Hasil CCT dengan pemasangan 2 DG.....	49
Tabel 4.5 Pengaruh DG Terhadap Rugi Daya.....	56

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik pada saat ini telah mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan ekonomi. Dalam hal ini, penyedia layanan energi listrik dituntut agar bisa memberikan suplai listrik kepada konsumen dengan memberikan kualitas listrik yang baik. Namun, pada era sekarang pembangkitan sistem energi konvensional mengalami permasalahan dimana bahan bakar fosil yang digunakan mengalami penipisan serta buruknya efisiensi dan polusi lingkungan. Oleh karena itu muncullah gebrakan baru dimana pembangkitan energi listrik pada level distribusi menggunakan pembangkit *non-conventional/renewable energy* seperti halnya *fuel cell*, tenaga angin, mini hydro dan lain-lain. teknologi ini dikenal dengan *Distributed Generation* (DG)[1].

Saat ini, penggunaan *Distributed Generation* (DG) sangatlah berguna di era modern ini. *Distributed Generation* berguna dalam mengatasi permasalahan kelistrikan yang terjadi di era modern ini. Contohnya saja dalam penyuplaian beban terjadi permasalahan ketidak efisiensi sistem. Penggunaan distributed generator dapat meningkatkan efisiensi dari sistem, mengurangi polusi, rugi transmisi dan menjamin kontinuitas penyaluran energi listrik. Dalam menjalankan sistem, kestabilan dari sistem kelistrikan sangat berhubungan dengan gangguan yang terjadi secara tiba-tiba dalam periode waktu misalnya gangguan hubung singkat (*short circuit*), lepasnya generator dari sistem kelistrikan (*generator outage*), serta penyalan motor (*motor starting*).

Secara umum stabilitas sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai sifat sistem yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem untuk memberikan reaksinya terhadap gangguan dalam keadaan kerja normal serta balik kembali ke keadaan semula bila keadaan menjadi normal[2]. Perkembangan sistem tenaga listrik pada era sekarang ini menyebabkan permasalahan stabilitas pada sistem yang telah dikembangkan yang mengakibatkan aliran daya yang terjadi tidak dapat dikontrol serta keandalan yang tidak baik akibat dari stabilitas yang bermasalah. Oleh karena itu masalah tersebut harus diatasi agar stabilitas

dari sistem tenaga listrik tersebut dapat diatasi dengan cara melakukan analisa kestabilan dari sistem tenaga listrik. Pada era sekarang ini, stabilitas dari sistem tenaga listrik menjadi bagian yang sangat penting dari penjalanan sistem tenaga listrik agar dapat bekerja secara maksimal tanpa adanya masalah atau gangguan.

Pada tugas akhir ini diusulkan pemodelan pada sistem real distribusi radial PLN GH Payakumbuh. Feeder Koto Nan 4 akan digunakan sebagai data pemodelan sistem. Penambahan DG jenis minihidro dan diesel akan diusulkan pada tugas akhir ini. Kestabilan sudut rotor akan diamati pada sistem baru sistem real distribusi radial PLN GH Payakumbuh.

1.2 Permasalahan

Perumusan masalah yang akan diangkat pada tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana menentukan dari pemasangan lokasi dari penempatan DG yang efektif.
2. Analisis stabilitas transien akibat gangguan hubung singkat, melakukan penambahan jumlah unit DG, jenis DG dan level pembangkitan daya aktif DG.
3. Melakukan simulasi analisa kestabilan sudut rotor pada sistem kelistrikan Jaringan Distribusi Kota Payakumbuh

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Data yang digunakan yaitu feeder Koto Nan 4 jaringan distribusi kota Payakumbuh.
2. Penentuan dari lokasi DG dengan mencari bus terpilih yang akan dipasang menggunakan metode analitik.
3. DG yang akan dipasang yaitu Diesel dan *PhotoVoltaic* dengan mempertimbangkan iklim dan pemeliharannya.
4. Penentuan level pembangkitan daya aktif DG tidak melalui optimasi, melainkan melalui pemenuhan profil tegangan yang baik (0,95-1,05 pu).

5. Analisis stabilitas transien minimal menggunakan dua generator dikarenakan program yang digunakan menggunakan program *multimachine*.
6. Analisis stabilitas transien minimal terhubung dengan 2 unit generator sinkron serta mengabaikan pengaruh governor, damping, dan tidak terhubung dengan infinite bus
7. Software yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini yaitu Matlab R2014a.
8. Pemasangan PV yaitu dengan menggunakan PQ model yang dimana PV hanya sebagai konstant power.
9. Pemasangan infinite bus menjadi sebuah generator dengan mengasumsikan inertia yang sangat besar serta reaktansi transien yang ≤ 0.4 pu.
10. Pemilihan bus pada pemasangan DG 2 tidak mengikut sertakan bus yang telah terpilih pada DG 1
11. Codingan Matlab merupakan hasil penelitian Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng. mengenai critical trajectory.

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Mendapatkan lokasi pemasangan DG yang paling efektif.
2. Mengetahui kondisi stabilitas transien apabila terjadi gangguan hubung singkat, penambahan jumlah unit DG, jenis DG dan level pembangkitan daya aktif DG.
3. Mendapatkan level sudut rotor yang stabil apabila terjadi gangguan.

1.5 Metodologi

Metodologi penyelesaian masalah dalam pembuatan tugas akhir ini meliputi:

1. Studi Literatur

Mempelajari prinsip kerja dari sistem distribusi radial serta mengenai kestabilan yang ada pada jaringan distribusi radial. Mempelajari

karakteristik dari kestabilan-kestabilan dan hal yang akan mempengaruhi kestabilan tidak terjaga dengan baik serta cara mengatasi kestabilan apabila terjadi masalah atau gangguan. Lalu juga dipelajari mengenai DG dan pengimplementasiannya pada jaringan distribusi radial.

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang terdapat pada jaringan distribusi Kota Payakumbuh. Mulai dari penyulang, data beban serta *single line diagram* dari jaringan distribusi radial kota payakumbuh. Serta mengumpulkan parameter DG yang sesuai.

3. Pemodelan Sistem

Tahap pemodelan sistem adalah dimana memodelkan dari jaringan distribusi Kota Payakumbuh dengan terhubung dengan DG. Disini ditentukan kapasitas dari DG yang akan digunakan dengan menggunakan software Matlab R2014a.

4. Simulasi dan Analisa Data

Setelah pemodelan sistem selesai akan dilakukan simulasi dengan menggunakan software Matlab.

5. Kesimpulan

Pada akhir penelitian akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisa yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Susunan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

1. Bab 1

Pada bab 1 dijelaskan tentang pendahuluan dan latar belakang penulis dalam mengambil judul tugas akhir, dan akan dijelaskan permasalahan serta tujuan dilakukannya tugas akhir dengan topik yang bersangkutan.

2. Bab 2

Pada bab 2 dijelaskan tentang sumber pustaka yang dijadikan dasar teori selama pelaksanaan tugas akhir. Sumber pustaka yang dijelaskan pada bab 2 merupakan sumber pustaka utama yang dijadikan pedoman oleh penulis.

3. Bab 3

Pada bab 3 dijelaskan tentang perancangan tugas akhir yang akan dilakukan, seperti data yang digunakan, serta persiapan program simulasi yang akan dijalankan.

4. Bab 4

Pada bab 4 dijelaskan tentang hasil simulasi dan analisis data yang telah dilakukan setelah proses simulasi program.

5. Bab 5

Pada bab 5 akan dijelaskan tentang kesimpulan dan saran penulis tentang tugas akhir yang telah dilakukan.

6. Lampiran

Hal-hal tambahan yang berkaitan dengan tugas akhir akan dilampirkan pada bagian ini.

1.7 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi referensi bagi Kota Payakumbuh dalam mengadakan sistem kelistrikan yang baru dengan terhubung Distributed generator.
2. Dapat menjadi bahan referensi mengenai skema dalam permasalahan sudut rotor yang terjadi pada jaringan distribusi radial.
3. Dapat menjadi bahan acuan bagi mahasiswa yang mengambil tema kestabilan transient.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

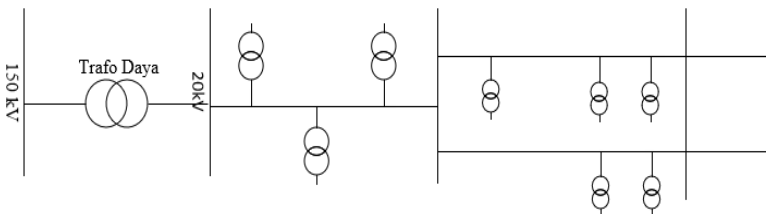
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem penyaluran tenaga listrik dibagi menjadi tiga tahapan yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam menyalurkan energi kepada konsumen pada penyaluran tenaga listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit konvensional memerlukan sistem transmisi dan distribusi agar tenaga listrik bisa sampai memenuhi kebutuhan beban. Sistem distribusi bertugas untuk membagi tenaga listrik ke beberapa pusat beban melalui gardu induk dan gardu hubung.

2.1.1 Jaringan Distribusi Radial

Jaringan distribusi radial merupakan jaringan distribusi yang paling sederhana dan banyak digunakan pada sistem distribusi. Jaringan distribusi ini digambarkan dengan PLN sebagai sumber utama dan menyuplai kebutuhan beban yang diperlukan dengan menggunakan percabangan secara radial.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Radial Sederhana

Dari gambar diatas dapat dilihat dimana beban yang membutuhkan daya diberikan dari satu sumber yaitu PLN. Sistem radial ini sendiri memiliki kelebihan seperti investasi yang murah dan sistem yang sederhana. Akan tetapi memiliki kekurangan yaitu dimana kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang

terjadi pada saluran relatif besar. Kekurangan yang terdapat pada jaringan ini adalah apabila terjadi masalah, kemungkinan *black out* atau mati total sangat tinggi dikarenakan sistem yang terdistribusi secara radial.

2.1.2 Sistem Distribusi Aktif

Jaringan distribusi listrik mengalami transisi dari sistem distribusi pasif menjadi sistem distribusi aktif. Distribusi pasif maksudnya arah aliran listrik hanya berlangsung satu arah (*unidirectional*) sedangkan distribusi aktif adalah aliran listrik yang berlangsung dua arah (*bidirectional*). Jaringan distribusi tanpa DG merupakan pasif karena tenaga listrik disuplai oleh grid utama ke masing-masing beban. Jaringan distribusi ini menjadi aktif ketika DG ditambahkan pada jaringan distribusi yang menyebabkan aliran daya listrik menjadi dua arah karena adanya suplai dari DG.

2.1.3 Keuntungan dan kerugian sistem distribusi radial

Keuntungan dari sistem distribusi radial secara umum adalah kesederhanaan susunan rangkaiannya sehingga menyebabkan kemudahan dalam studi aliran daya dan pengaturan tegangannya. Selain itu, dari segi biaya investasi distribusi radial relatif murah, hal ini dikarenakan penggunaan komponennya yang sedikit. Namun distribusi radial juga memiliki kekurangan yaitu kontinuitas pelayanan daya kurang maksimal karena tidak terdapat alternatif jaringan apabila terjadi gangguan. Daerah yang terletak dibawah titik gangguan atau yang lebih jauh dari sumber akan terisolasi. Kerugian lainnya adalah kualitas tegangan yang kurang baik disebabkan drop tegangan yang semakin besar terjadi pada ujung saluran yang jauh dari sumber.

2.2 Distributed Generation

Distributed Generation bukanlah konsep baru elektro, namun telah lama dikenal dalam dunia sistem ketenagalistrikan yang ditandai dengan percobaan total energi sekitar tahun 1960 dan Packaged Cogeneration pada tahun 1980 (Friedman, 2001) [2]. Karena peletakan DG yang tersebar maka DG dapat diintegrasikan dengan sistem distribusi untuk memenuhi kebutuhan beban. Jadi, *Distributed Generation* atau yang biasa disebut DG adalah teknologi yang menyediakan tenaga listrik dengan skala kecil dimana tenaga listrik tersebut dekat dengan lokasi pelanggan untuk memenuhi kebutuhan pelanggan ,untuk mendukung operasi

ekonomi dari jaringan distribusi daya yang ada, agar permintaan energi yang terus meningkat dapat terpenuhi. Saat ini, upaya intensif dilakukan untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan (seperti angin) dan sumber-sumber yang tidak terbarukan (seperti turbin gas, highefficiency skema Combined Heat and Power (CHP) skala kecil) untuk menghasilkan tenaga listrik [1]. Dari beberapa studi dapat disimpulkan bahwa DG :

1. Tidak terpusat, dan dekat dengan beban
2. Berkapasitas kecil dari 50 MW
3. Terhubung dengan sistem distribusi tegangan mencapai 145 kV.

Berikut adalah tabel pengklafikasian unit DG berdasarkan kapasitasnya [3] :

Tabel 2.1 Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkitan

Classification	Technical Capacity	Typical Installation
Micro	< 2 kW	Rooftop solar PV
Mini	2 kW – 10 kW	Fuel cell, combined heat
Small	10 kW – 1 MW	Biomass, small hydro
Medium	1 MW – 5 MW	Biomass, hydro, local wind, diesel
Large	> 5 MW	Hydro, solar thermal, wind farm, diesel

Tabel 2.2 Tipe DG berdasarkan kapasitas teknologi [4]

Teknologi <i>Distributed Generation</i> (DG)	<i>Capacity / modul</i> (Kapasitas / modul)
Fossil Fuel	
<i>Combined cycle gas turbine (CCGT)</i>	35 – 400 MW
<i>Internal combustion engines</i>	1 kW – 250 MW
<i>Combustion turbine</i>	5MW – 50 MW
<i>Micro - turbine</i>	50 MW – 300 MW
Renewable Resource	
<i>Small hydro</i>	1 – 100 MW
<i>Micro hydro</i>	25 kW – 1 MW
<i>Wind turbine</i>	200 Watt – 3 MW
<i>Photovoltaic array</i>	20 Watt – 1000 kW
<i>Solar terminal, central receiver</i>	1 – 10 MW
<i>Solar terminal, Luiz system</i>	10 – 80 MW
<i>Biomass, e.g based on gastification</i>	100 kW – 20 MW
<i>Fuel cells, solid oxide</i>	250 kW – 2 MW
<i>Geothermal</i>	5 – 100 MW
<i>Ocean energy</i>	100 kW – 1 MW
<i>Stirling engine</i>	2 – 10 kW
<i>Battery storage</i>	500 kW – 5 MW

2.1.4 Keuntungan dari Distributed Generation

DG termasuk teknologi yang terus berkembang dan dapat beradaptasi dengan perubahan ekonomi dalam cara yang fleksibel karena ukurannya yang kecil dan konstruksi yang lebih sederhana dibandingkan dengan pusat-pusat pembangkit konvensional. Sebagian besar DG memang sangat fleksibel dalam beberapa hal seperti operasi, ukuran, dan kemajuan teknologi. Selain itu, DG dapat meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik.

Dalam pemasangannya di jaringan distribusi, DG ditempatkan dekat dengan daerah beban dan beberapa keuntungan dalam pemakaian DG:

1. DG memberi keandalan yang lebih tinggi dalam pemanfaatan daya
2. DG sebagai sumber energi lokal dapat membantu untuk penghematan daya
3. Dibandingkan dengan *power plants*, DG memiliki efisiensi yang lebih tinggi dalam penyaluran daya. Selain itu, bila dikoneksikan pada jaringan, DG dapat meningkatkan efisiensi sistem karena DG membantu mengurangi rugi-rugi pada sistem.
4. Dalam memproduksi energi listrik, DG bersifat ramah lingkungan. Emisi yang dihasilkan dari produksi energi listrik oleh DG tergolong rendah, bahkan mendekati nol

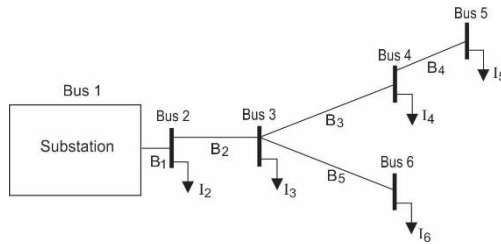
2.3 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya secara umum disebut sebagai *loadflow* yang merupakan inti dari analisis, perencanaan sebuah sistem tenaga listrik dan dibutuhkan untuk pengembangan dan operasi sistem tenaga listrik, serta penjadwalan pembangkit. Dan analisis aliran daya juga diperlukan pada analisis kestabilan transien dan studi *contingency*. Pada studi analisis aliran daya terdapat beberapa metode seperti Gauss-Seidel, Newton Raphson, Fast Decouple dan metode lainnya[5]. Pada penelitian ini digunakan studi aliran daya *Topology Network*. Dalam pemecahan permasalahan aliran daya, sistem diasumsikan dalam keadaan beroperasi dibawah kondisi seimbang. Pada sistem bus terdapat beberapa jenis bus, yaitu :

1. Bus Tidak Aktif (*Slack Bus*)
Merupakan bus yang digunakan sebagai referensi dimana terdapat spesifikasi magnitudo dan sudut fasanya.
2. Bus Beban (*Load Bus*)
Merupakan bus yang terdapat spesifikasi berupa daya aktif dan daya reaktif sedangkan magnitudo dan sudut fasanya tidak diketahui. Bus ini biasa disebut P-V Bus.
3. *Voltage-Controlled Bus (Regulated Bus)*
Bus ini merupakan bus generator yang memiliki spesifikasi berupa daya aktif dan magnitudo tegangannya. Batasan nilai untuk daya reaktif juga diketahui, Sudut fasa dari tegangannya tidak diketahui.

2.3.1 Analisis Aliran Daya *Topology Network*

Analisis aliran daya listrik mempunyai berbagai macam metode dalam menganalisis sebuah sistem tenaga listrik. *Topology network* merupakan salah satu metode analisis aliran daya listrik yang dalam penyelesaiannya menggunakan pemodelan bentuk topologi jaringan menjadi bentuk persamaan matematika, yang selanjutnya dihitung dan diiterasi sehingga diperoleh nilai arus, tegangan, rugi – rugi daya dan total daya pembangkitan yang diperlukan oleh sistem. Analisis aliran daya *topology network* sangat cocok diterapkan pada sistem tenaga dengan topologi jaringan radial. Berikut diberikan contoh sistem radial yang ditunjukkan pada Gambar dibawah ini.



Gambar 2.2 Contoh single line diagram radial

Tahap awal yang dilakukan adalah menghitung besar arus yang mengalir pada saluran yang dimodelkan dalam bentuk matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*). Besar arus saluran dapat ditulis dalam persamaan berikut :

$$I_n = \left(\frac{P_n + jQ_n}{V_n} \right)^* \quad (1)$$

Dengan menerapkan persamaan *Kirchoff Current Laws* pada jaringan gambar 2.2, injek arus pada setiap bus dapat dimodelkan kedalam bentuk fungsi matriks. Saluran dimodelkan dengan variable $B_1 - B_5$. Persamaan injeksi arus pada setiap bus dengan menggunakan persamaan (1) dapat dimodelkan kedalam bentuk matrik. Berikut hasil pemodelannya kedalam matrik [6].

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Maka persamaan yang lebih sederhana dan sama dapat ditulis menjadi

$$[B] = [\mathbf{BIBC}][I] \quad (3)$$

Hubungan antara arus saluran dan tegangan dapat diperoleh melalui persamaan berikut.

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \quad (4)$$

$$V_3 = V_2 - B_2 \cdot Z_{23} \quad (5)$$

$$V_4 = V_3 - B_3 \cdot Z_{34} \quad (6)$$

Dimana pada Z_{12} , Z_{23} , Z_{34} merupakan impedansi saluran dari section 1-2, 2-3 dan 3-4. Dengan mensubstitusikan persamaan (4) dan (5) kedalam persamaan (6), maka tegangan pada bus 4 dapat ditulis menjadi

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (7)$$

Selanjutnya tegangan bus dapat disusun dalam sebuah fungsi matriks dari arus saluran (BIBC), sehingga diperoleh matriks BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*) dengan cara yang sama seperti cara diatas didapatkan persamaan (8) matriks BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Maka persamaan yang lebih sederhana dan sama dapat ditulis menjadi

$$[\Delta V] = [\mathbf{BCBV}][B] \quad (9)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (9) maka pada akhir penurunan persamaan diperoleh nilai ΔV dapat ditulis dengan persamaan (9) dan disederhanakan menjadi persamaan (10) sebagai berikut :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (9)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (10)$$

dimana, $[DLF] = [BCBV][BIBC]$,

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I^k] \quad (11)$$

$$[V]^{k+1} = [V_1] - [\Delta V^{k+1}] \quad (12)$$

V_1 merupakan tegangan dari Swing bus, sehingga dari persamaan (11) diperoleh nilai deviasi tegangan pada setiap bus, yang selanjutnya akan diperbarui nilai dari persamaan (12) pada setiap iterasi, sehingga diperoleh tegangan yang valid setelah iterasi menjadi konvergen.

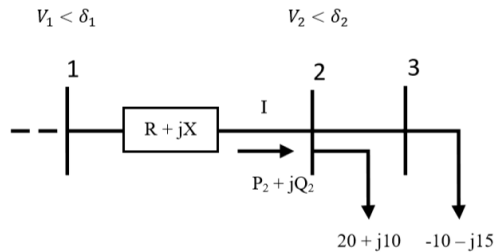
2.3.2 Analisis Aliran Daya Aktif

Adanya konektivitas DG pada sistem kelistrikan menyebabkan proses pengaliran daya tidak berasal dari satu sumber saja, melainkan dari dari sumber lain (DG) yang terhubung pada suatu bus pada sistem tersebut. Dalam mempermudah perhitungan, maka sumber lain tersebut dimodelkan dengan negatif PQ bus atau PV bus. PQ model digunakan untuk memodelkan generator yang terpasang pada sistem distribusi (DG) menjadi beban negatif. Hal ini terjadi karena karakteristik dari generator yang berlawanan dengan karakteristik beban. Beban memiliki karakteristik menyerap daya sedangkan generator menyuplai daya, perbedaan aliran (menyerap dan menyuplai) dari keduanya inilah yang melahirkan pemodelan negatif PQ bus. Persamaan negatif PQ bus adalah sebagai berikut :

$$P = - P_s \quad (13)$$

$$Q = - Q_s \quad (14)$$

Agar lebih jelas, persamaan di atas akan dirinci pada contoh di bawah ini beserta ilustrasi gambarnya. Ketika pada bus 3 dipasang DG dengan kapasitas $10 + j5$, total beban yang terpasang pada bus 2 akan mempertimbangkan adanya DG pada bus 3 menjadi $20 + j10 - 10 - j5 = 10 + j5$. Jika DG pada bus 3 diganti dengan beban yang mempunyai nilai yang sama, maka total beban yang terpasang adalah $20 + j10 + 10 + j5 = 30 + j15$.



Gambar 2.3 Ilustrasi pemodelan negatif PQ bus

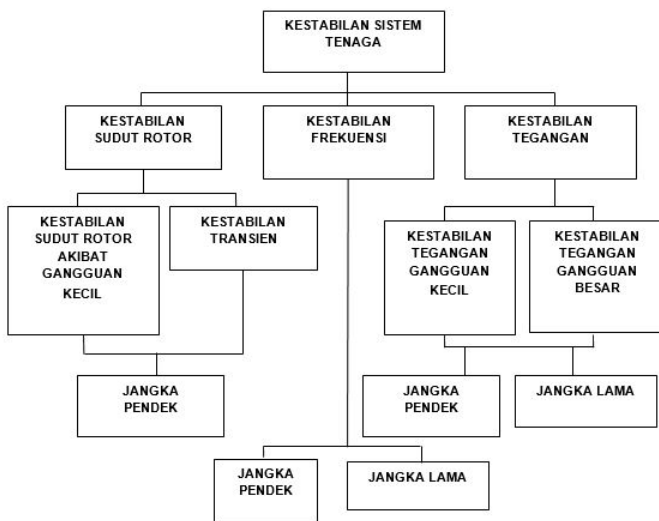
2.4 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem tenaga listrik agar bisa berada pada kondisi normal ketika terjadi gangguan. Dalam kestabilan sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya output listrik disebut daya elektrik pada sistem dan daya input mekanis disebut daya mekanik pada prime mover. Ketika sistem mendapatkan gangguan, maka terjadi perbedaan daya elektrik dan daya mekanik. Putaran rotor generator dapat membuat perlambatan akibat dari daya elektrik yang berlebih yang diakibatkan semakin terbebaninya generator. Namun apabila mengalami kelebihan daya mekanik dapat mengakibatkan percepatan putaran rotor yang dimana beban yang ditanggung generator semakin ringan. Apabila tidak diatasi akan terjadinya ketidaksinkronan suatu sistem yang disebabkan oleh percepatan dan perlambatan itu. Maka analisis dari kestabilan sangat dibutuhkan agar dapat mengatasi permasalahan yang terdapat pada sistem.

Berdasarkan paper IEEE Transactions On Power Systems dengan judul Definition and Classification of Power System Stability, kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga, yaitu :

1. Kestabilan Tegangan
2. Kestabilan Frekuensi
3. Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan itu sendiri merupakan hal yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Dikarenakan apabila sebuah sistem tidak stabil maka akan dapat merusak dari segi peralatan dan segi sistem yang ada pada sistem tenaga listrik itu sendiri. Berikut adalah gambar klasifikasi sistem kestabilan tenaga listrik.



Gambar 2.4 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

Dari beberapa pembahasan yang ada diatas mengenai klasifikasi kestabilan sistem tenaga,yang akan dibahas pada buku ini adalah mengenai kestabilan sudut rotor.

2.4.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan yang dapat dilakukan dari beberapa mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga agar bisa mempertahankan kondisi stabil atau sinkron apabila terjadi gangguan. Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada masing masing mesin [6]. Ketidakstabilan tersebut dapat mengakibatkan berubahnya kecepatan sudut ayunan generator sehingga generator mengalami hilang sinkronisasi dengan generator yang lain. Hal tersebut disebabkan daya output dari generator berubah sesuai dengan berubahnya sudut rotor

Respon sudut rotor generator mengalami penyimpangan dan dipengaruhi oleh ketidaklinieran hubungan sudut daya. Dalam melakukan percobaan stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan. Untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik. Kestabilan sudut rotor kecil dan kestabilan transien dikategorikan sebagai fenomena jangka pendek.

Kestabilan dari sudut rotor dapat diakibatkan oleh gangguan kecil merupakan kemampuan dari sistem tenaga agar bisa mempertahankan kesinkronan sistem akibat gangguan yang terjadi. Ketidak stabilan sistem dapat diakibatkan oleh dua hal antara lain, kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi sumping. Sedangkan gangguan besar pada kestabilan sudut rotor atau yang biasa disebut dengan transien yaitu dimana sistem dapat mempertahankan kondisi sinkronisme suatu sistem disaat terjadi gangguan yang besar.

Kestabilan sudut rotor terbagi atas dua macam :

1. *Small Signal Stability*

Small Signal Stability adalah kemampuan dari sistem tenaga dimana agar bisa tetap berada pada kondisi sinkronnya pada saat terjadi gangguan yang kecil. Ketidakstabilan ini terjadi akibat dua hal antara lain kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi damping.

2. *Transient stability*

Transient Stability adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk tetap berada pada kondisi sinkronnya pada saat terjadi gangguan

transien, untuk studi gangguan stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah terjadi gangguan untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik.

2.5 Analisis Stabilitas Transien berdasarkan Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem tenaga listrik tanpa terhubung infinite bus dinotasikan menggunakan X_d' model generator. Setiap generator terdiri dari dua persamaan diferensial. Dalam simulasi numerical simulation method menggunakan Centre of Inertia (COI) dari persamaan ayunan [7]. Persamaan tersebut disajikan di bawah ini :

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - D_i(\omega \tilde{r}) \quad (15)$$

$$\dot{\theta}_i = \omega \tilde{r} \quad (16)$$

Dimana :

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i ; \omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i ; \delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i ; \quad (17)$$

$$M_T = \delta_i - \delta_0 ; \dot{\omega}_i = \omega_i - \omega_0 ; P_{COI} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\theta)) ; \quad (18)$$

$$P_{ei}(\theta) = \sum_{j=i}^n Y_{ij} E_i E_j \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_{ij}) \quad (19)$$

Keterangan:

P_{mi} : Daya mekanis

ω_i : Kecepatan sudut generator

θ_i, δ_i : Sudut rotor generator

M_i : Momen inersia

D_i : Koefisien redaman

E_i : Tegangan generator

P_{ei} : Daya elektrik

M_T : Total momen inersia

Ketika sistem terhubung dengan infinite bus, maka pemodelan sistem seperti pada persamaan :

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e(\delta) \quad (20)$$

Keterangan :

MT : Momen inersia

$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$: Percepatan sudut

P_m : Daya mekanis

P_e : Daya elektrik

Ketika system terhubung dengan *infinite bus*, maka dimodelkan seperti pada persamaan :

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e(\delta) \quad (21)$$

Keterangan:

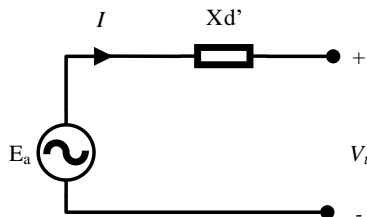
M_T : Momen inersia

$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$: Percepatan sudut

P_m : Daya mekanis

P_e : Daya elektrik

Nilai P_m dan P_e dicari dengan memodelkan generator seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.5 Pemodelan Generator

Dari gambar 2.5 didapat persamaan:

$$E_a = jx'_d \cdot I + V_t \quad (22)$$

$$I = \frac{S}{V} \quad (23)$$

$$S = P - jQ \quad (24)$$

Dengan substitusi persamaan 23 kedalam persamaan 22 didapat:

$$E_a = jx'_d \cdot \frac{S}{V} + V_t \quad (25)$$

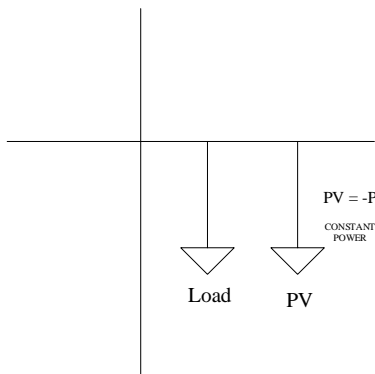
Untuk daya mekanis generator didapat melalui:

$$P_m = E_a^* \cdot Y_{red_pre} \cdot E_a \quad (26)$$

Dan daya listrik generator didapat melalui:

$$P_e = v \cdot (Y_{red_post} \cdot v)^* \quad (27)$$

Sedangkan pada pemodelan PV yang akan dipasang pada sistem bisa dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.6 Pemodelan *PhotoVoltaic*

Pemodelan dari PV yang akan dipasang diilustrasikan pada gambar diatas. Pemasangan dari PV tersebut dengan menggunakan PQ model. Yang dimana PV yang akan dipasang yaitu dengan konstant power. Yang dimana PV akan selalu mensuplai daya ke beban sebanyak kapasitas yang telah ditentukan.

2.6 Penentuan Lokasi DG Berdasarkan Metode Analitik

Pada tahap ini adalah dimana kita mencari lokasi tempat pemasangan dari Distributed Generator itu sendiri. Pemasangan dari DG ini sendiri harus memperhitungkan beberapa point. Tahapan ini adalah dengan menentukan nilai P loss dan Q loss dengan cara mengestimasi besarnya nilai P dan Q loss pada setiap pemasangan DG yang optimal pada bus yang akan dipasang, dengan menggunakan persamaan (14) yang ditulis sebagai berikut [8].

$$TPloss_{dg} = \sum_{n=2}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} \left[(P_n - P_{dgi})^2 + (Q_n - P_{dgi} \tan \phi_i)^2 \right] + \sum_{n=1+1}^i \frac{r_{n-1}}{V_n^2} [P_n^2 + TQ_n^2] \quad (14)$$

Dengan memasukkan nilai *inject* daya aktif (P_n) dan daya reaktif (Q_n) pada bus ke – n yang dapat diperoleh dari analisis aliran daya pada kondisi awal, faktor daya DG ($\cos \phi_i$), resistansi dari saluran (r_{n-1}), tegangan pada kondisi awal (V_n) serta nilai ukuran DG yang optimal (P_{dgi}) ke dalam persamaan (14). Sehingga dari perhitungan persamaan (14) diperoleh nilai total rugi – rugi daya aktif setelah dipasang DG pada sistem (TPlossdg) pada jaringan.

Perhitungan pada tahapan ini mendapatkan hasil TPlossdg sebanyak jumlah bus selain bus sumber atau generator. Nilai TPlossdg bukan merupakan nilai sebenarnya dari total rugi daya aktif setelah dipasang DG pada sistem, melainkan merupakan pendekatan nilai sebenarnya dari total rugi daya aktif setelah dipasang DG pada sistem, hal ini terjadi karena penentuan nilai total rugi daya aktif tersebut bukan diperoleh dari hasil analisis aliran daya tapi dari hasil estimasi TPlossdg dengan persamaan (14) serta pada persamaan (14) ini menggunakan tegangan kondisi awal sistem (V_n). Tetapi hal ini cukup akurat untuk menentukan total rugi daya aktif pada sistem setelah terpasang DG pada

bus ke – n. Jika dibandingkan, penentuan total rugi daya aktif menggunakan aliran daya dengan penggunaan persamaan (14) akan lebih efektif dan cepat jika menggunakan cara pada persamaan (14). Karena tidak perlu melakukan analisis aliran daya sebanyak jumlah bus beban selain bus sumber.

Pada tahap berikutnya adalah menentukan lokasi optimal dari pemasangan DG. Penentuan lokasi optimal DG dilakukan, dengan *meranking* nilai TPlossdg dari nilai terkecil sampai terbesar, yang selanjutnya dipilih lokasi dengan ukuran DG yang telah ditentukan pada tahap sebelumnya dengan nilai TPlossdg yang paling minimal.

2.7 Persamaan Ayunan

Untuk melakukan analisis kestabilan suatu sistem tenaga listrik, maka hal pertama yang harus dilakukan adalah membangun model matematika yang dapat menggambarkan dinamika sistem tenaga listrik saat ada gangguan besar. Model matematika yang dipakai untuk pembangkit listrik adalah persamaan ayunan (swing equation).

Persamaan ayunan adalah persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dalam dinamika yang menyatakan :

”Momen putar percepatan (accellarating torque) adalah hasil kali momen kelembaban (moment of inertia) rotor dan percepatan sudutnya” .

Rumus persamaan ayunan :

$$J = \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (28)$$

Keterangan :

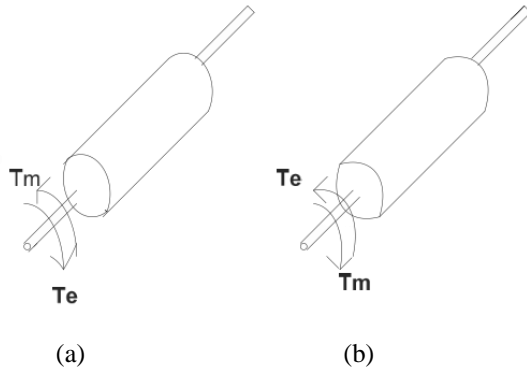
J : Momen inersia dari massa rotor (kg-m)

θ_m : Perubahan sudut rotor terhadap axis stasioner (rad)

t : Waktu (s)

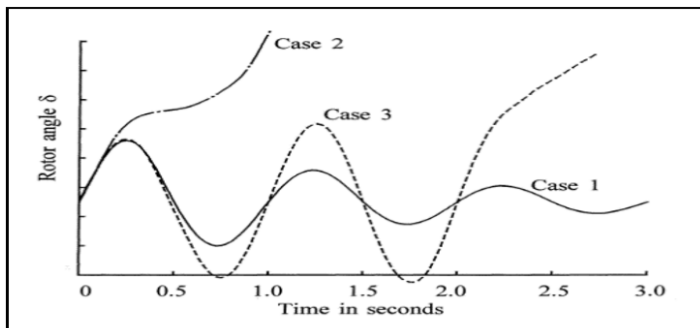
T_m : Momen putar mekanis (N-m)

T_e : Momen putar elektrik (N-m)



Gambar 2.7 Representasi suatu rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektrik pada (a) Generator (b) Motor

Percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) terjadi apabila gangguan terjadi setelah kondisi steady state. Perubahan putaran rotor dapat mengakibatkan hilangnya sinkronisasi jika gangguan tidak dibersihkan secara cepat. Transient stability study menyebutkan bahwa pembersihan dilakukan dalam kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan, sedangkan pada sistem yang sangat besar waktu tersebut dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik.



Gambar 2.8 Ilustrasi kondisi stabil dan tidak stabil

Gambar 2.7 mengilustrasikan kondisi stabil dan tidak stabil suatu generator sinkron. Pada case 1 memperlihatkan kondisi stabil, dimana sudut rotor terus meningkat hingga pada akhirnya mengalami osilasi yang terus mengecil hingga mencapai kondisi steady-state. Case 2 memperlihatkan kondisi first swing instability, sudut rotor terus bertambah hingga generator lepas sinkron. Pada case 3 terdapat fenomena multi swing instability, osilasi pada generator akhirnya membesar dan menyebabkan generator menjadi hilang sinkronisasi.

2.8 Metode Critical Trajectory

Sistem tenaga listrik pada era ini telah berkembang menjadi sistem yang bisa diandalkan dengan efisiensi yang baik. Akan tetapi gangguan yang dapat terjadi tidak dapat dihindari. Salah satu gangguan yang paling umum adalah hubung singkat. Metode critical trajectory atau bisa disebut dengan metode lintasan kritis. Metode ini menggunakan fungsi energi agar bisa menentukan generator kritis dari sistem. Ketika gangguan besar terjadi yang dapat mempengaruhi stabilitas sudut rotor, yang merupakan fokus utama dari stabilitas sementara, generator ini dianalisis. Metode ini hanya menganalisis genset atau generator kritis dengan energi terbesar sehingga dibuat untuk mempercepat perhitungan. Waktu kliring kritis (CCT) atau waktu maksimum yang diizinkan selama interupsi diperoleh langsung pada akhir proses[7].

2.9 Critical Clearing Time

Seperti dalam yang tertulis pada IEEE waktu kliring kritis didefinisikan sebagai, "Jika gangguan tertentu mencakup inisiasi dan isolasi kesalahan pada sistem tenaga, waktu pembersihan kritis adalah waktu maksimum antara inisiasi dan isolasi sehingga sistem tenaga transien stabil ". Dalam (laporan IEEE, 1982), Transient Stability of Power System didefinisikan sebagai, "Sistem tenaga dimana apabila sistem berada pada kondisi operasi mengalami gangguan, setelah itu dilakukan analisa agar sistem yang mengalami gangguan tersebut kembali pada kondisi *steady-state* ". Tujuan dari studi stabilitas transien adalah untuk memastikan apakah sudut beban kembali ke nilai stabil setelah gangguan. Untuk generator sinkron (SGs), ada sudut rotor maksimum (sudut kliring kritis) di bawah dimana SG dapat mempertahankan operasi yang stabil. Waktu kliring maksimum yang sesuai dikenal sebagai waktu

kliring kritis[1]. Guna mengisolasi gangguan agar tidak menyebar pada seluruh sistem, maka pembukaan circuit breaker (CB) saluran ataupun generator harus kurang dari waktu pemutus kritisnya. Waktu pemutus kritis ini biasa disebut dengan critical clearing time (CCT). Tujuan pemutusan sebelum waktu pemutus kritis adalah untuk menjaga sistem agar tetap atau kembali pada kondisi stabilnya, namun apabila pemutusan dilakukan setelah waktu pemutus kritisnya dapat dipastikan generator akan kehilangan sinkronisasinya

2.10 Metode Reduksi Kron

Demi kemudahan alur perhitungan terhadap stabilitas transien pada sistem multimesin maka digunakanlah reduksi matrik yang biasa disebut dengan metode reduksi kron[9] [10]. Metode tersebut mereduksi matrik admitansi yang bernilai 0 karena tidak adanya arus yang masuk ataupun keluar pada bus tertentu.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{m+n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1(m+n)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2(m+n)} \\ Y_{n1} & Y_{nm} & \cdots & Y_{n(m+n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(m+n)1} & Y_{(m+n)1} & \cdots & Y_{(m+n)(m+n)} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Persamaan 29 dapat dengan sederhana ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_m \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (30)$$

Dimana, n menunjukkan bus beban dan m menunjukkan bus generator. Dikarenakan tidak adanya arus yang mengalir pada bus beban, maka:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_m \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (31)$$

Dari persamaan 31 didapat:

$$Y_n V_n + Y_{nm} E_m = 0 \quad (32)$$

$$V_n = -\left(\frac{Y_{nm} E_m}{Y_n}\right) = -(Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) \quad (33)$$

$$Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E_m = I_m \quad (34)$$

Dengan substitusi persamaan 33 kedalam persamaan 34, didapat:

$$I_m = Y_{nm}^t (-Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (35)$$

$$I_m = (-Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (36)$$

$$Y_{reduksi} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} \quad (37)$$

$$I_m = Y_{reduksi} E_m \quad (38)$$

Dengan penyederhanaan diatas, akan mempermudah perhitungan dan analisis stabilitas transien pada sistem.

2.11 Metode Runge-kutta Orde 4

Metode runge-kutta memperkirakan penyelesaian dari deret taylor, namun penyelesaian tersebut tidak seperti deret taylor yang sesungguhnya. Metode runge-kutta tidak membutuhkan evaluasi eksplisit dari turunan yang lebih tinggi dari sebelumnya. Efek dari adanya turunan yang lebih tinggi adalah dimasukkannya beberapa evaluasi dari turunan pertama.

Dalam metode runge-kutta orde 4, dimana nilai X diperoleh ketika $t = t_0 + \Delta t$ secara umum memiliki persamaan sebagai berikut :

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (39)$$

Dimana:

$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t \quad (40)$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (41)$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (42)$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t \quad (43)$$

Keterangan:

k_1 = (lengkungan pada saat awal time step)* Δt

k_2 = (pendekatan pertama pada lengkungan saat pertengahan step)* Δt

k_3 = (pendekatan kedua pada lengkungan saat pertengahan step)* Δt

k_4 = (lengkungan pada saat akhir time step)* Δt

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PERANCANGAN DAN PEMODELAN SISTEM

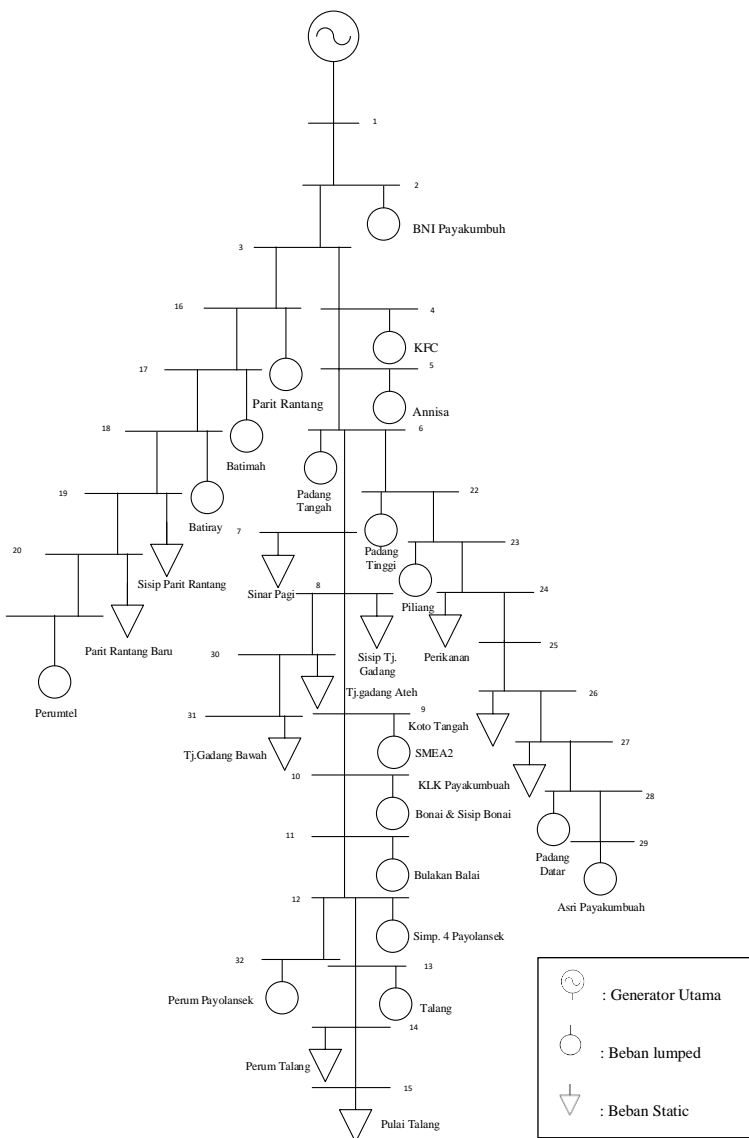
3.1 Sistem Distribusi PLN Kota Payakumbuh

Pada Tugas Akhir kali ini, akan dibahas mengenai sistem distribusi kota Payakumbuh. Kota Payakumbuh itu sendiri merupakan salah satu kota yang terletak di provinsi Sumatera Barat. Topologi jaringan dari sistem distribusi kota Payakumbuh, sistem ini termasuk sistem distribusi radial karena oercabangannya ditarik dari satu sumber yaitu gardu hubung. Terdapat beberapa penyulang yang terhubung pada gardu hubung payakumbuh. Dalam penelitian ini digunakan Koto Nan 4.

3.1.1 Sistem Kelistrikan Penyulang Koto Nan 4

Sistem kelistrikan dari penyulang koto nan 4 merupakan salah satu dari beberapa penyulang yang terhubung dengan gardu hubung payakumbuh. Gardu hubung payakumbuh terhubung langsung dengan gardu induk payakumbuh. Berikut akan diberikan data penyulang yang dipakai pada tugas akhir ini. Sistem yang dipakai pada penyulang ini didapatkan langsung dari PLN kota Payakumbuh.

Berikut adalah sistem kelistrikan dari penyulang Koto Nan 4 yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Single Line Diagram Penyulang Koto Nan 4

Tabel 3.1 Data Sistem Kelistrikan Feeder Koto Nan 4

Nomor Cabang	Bus Kirim	Bus Terima	Resistansi	Reaktansi	Daya Beban Pada Cabang	
			R	X	P	Q
			(Ω)	(Ω)	MW	MVAR
2	1	2	0,05432	0,04886	0,213	0,132
3	2	3	0,06539	0,05881	0	0
4	3	4	0,0674	0,06062	0,136	0,084
5	4	5	0,05734	0,05157	0,043	0,026
6	5	6	0,07042	0,06333	0,136	0,084
7	6	7	0,07142	0,06424	0,16	0
8	7	8	0,07042	0,06333	0,25	0
9	8	9	0,0674	0,06062	0,136	0,084
10	9	10	0,05734	0,05157	0,17	0,105
11	10	11	0,07545	0,06786	0,136	0,084
12	11	12	0,07545	0,06786	0,043	0,026
13	12	13	0,0503	0,04524	0,213	0,132
14	13	14	0,0503	0,04524	0,16	0
15	14	15	0,04426	0,03981	0,16	0
16	3	16	0,04024	0,03619	0,17	0,105
17	16	17	0,04024	0,03619	0,136	0,084
18	17	18	0,04527	0,04071	0,136	0,084
19	18	19	0,04527	0,04071	0,2	0
20	19	20	0,0503	0,04524	0,2	0
21	20	21	0,04728	0,04252	0,136	0,084
22	6	22	0,05734	0,05157	0,043	0,026
23	22	23	0,04326	0,0389	0,085	0,053
24	23	24	0,05332	0,04795	0,05	0
25	24	25	0,05734	0,05157	0	0
26	25	26	0,06036	0,05428	0,2	0
27	26	27	0,0503	0,04524	0,25	0
28	27	28	0,04527	0,04071	0,213	0,132

Tabel 3.1 Data Sistem Kelistrikan Feeder Koto Nan 4 (lanjutan)

Nomor Cabang	Bus Kirim	Bus Terima	Resistansi	Reaktansi	Daya Beban Pada Cabang	
			R	X	P	Q
			(Ω)	(Ω)	MW	MVAR
29	28	29	0,04527	0,04071	0,213	0,132
30	8	30	0,04527	0,04071	0,25	0
31	30	31	0,05432	0,04886	0,25	0
32	12	32	0,05734	0,05157	0,136	0,084
Total			1,7152	1,54259	4,624	1,541

Feeder yang saya pakai yaitu Koto Nan 4 yang jaringannya terhubung langsung dengan GH Payakumbuh. Feeder ini merupakan feeder yang memiliki total beban yang cukup besar pada jaringan yang terhubung GH Payakumbuh. Pada feeder ini,terdapat 18 lumped load dan 11 static load.

3.2 Data Pembangkitan

Dari sejumlah pembangkit DG dan PLN berikut jumlah suplai yang diberikan pada saat keadaan normal. Daya yang terbangkitkan oleh DG akan disuplai langsung ke jaringan distribusi. DG yang dihasilkan menggunakan persentase kapasitas beban yang dibutuhkan. Sedangkan DG yang akan digunakan pada penyulang ini yaitu menggunakan generator diesel dan photovoltaic.

3.1.2 *Power Grid* (GH Payakumbuh PLN)

Dalam sistem distribusi ini,dimodelkan dengan *grid* yang diintegrasikan dengan jaringan distribusi PLN sebesar 20 kV. Pemodelan *grid* pada tugas akhir ini dimodelkan menjadi sebuah generator yang berkapasitas besar. Berikut adalah spesifikasi dari generator utama.

Tabel 3.2 Spesifikasi Generator Utama

Generator Utama	
Tipe/Jenis	Generator Sinkron
Letak Bus	1
Mode Operasi	Swing/Slack
Konstanta Inersia	50 pu
Reaktansi Transien	0.324 pu
Frekuensi	50 Hz

Pemodelan dari grid menjadi sebuah generator sinkron adalah dikarenakan program yang digunakan tidak terhubung dengan infinite bus. Oleh karena itu parameter yang digunakan pada konstanta inersia bernilai sangat besar agar bisa mensuplai daya dari grid yang dimodelkan sebagai generator kepada beban. Sementara nilai reaktansi transien yang digunakan diasumsikan bernilai 0.324 pu yang dimana nilai reaktansi transien memiliki range yang akan dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.3 Reaktansi Generator

Table of Generator Reactances			
Name	Symbol	Range	Importance
Sub-transient Reactance	X''_d	0.08 to 0.26	Determines max. inst. current
Transient Reactance	X'_d	0.16 to 0.45	Determines current when breaker opens
Synchronous Reactance	X_d	2.0 to 3.9	Determines steady state current
Zero Sequence Reactance	X_0	0.02 to 0.25	To determine fault current in grounded neutral machines

Tabel 3.3 Reaktansi Generator (lanjutan)

Negative Phase Sequence Reactance	X2	0.1 to 0.4	To determine current in line-to-line faults
-----------------------------------	----	------------	---

3.1.3 Distributed Generation

Jenis DG yang digunakan pada sistem ini adalah jenis dari generator diesel dan PhotoVoltaic. DG diesel memiliki momen inersia dan reaktansi transien yang berpengaruh pada kecepatan putar maupun sudut rotornya. DG jenis diesel akan mensuplai daya aktif dan reaktif pada sistem. Pada DG yang dipasang akan dilakukan peletakan dan kapasitas dari DG yang akan dipasang. Besar daya aktif bergantung pada level yang dibangkitkan, sedangkan daya reaktif tergantung dari faktor daya yang digunakan. Oleh karenanya, DG berjenis photovoltaic akan mensuplai daya aktif saja ke dalam sistem.

Tabel 3.4 Spesifikasi *Distributed Generation*

Distributed Generation		
Jenis/Tipe	Diesel	PhotoVoltaic
Konstanta Inersia	9 pu	-
Reaktansi Transien	0.232 pu	-
Faktor Daya	0.85	1

Pembangkitan dari DG yang akan dipasang juga dengan melakukan pemasangan dengan mengasumsikan konstanta inerti dan reaktansi transien dari generator diesel. Dimana itu mempengaruhi kecepatan putar dan sudut rotornya.

Data diatas merupakan data spesifikasi dari DG yang akan dipasang. Dan pembangkitan dari DG tersebut juga terbagi atas beberapa macam. Berikut adalah data pembangkitan dari DG yang akan dipasang. Rumus level pembangkitan DG dijabarkan sebagai berikut.

$$\% \text{ Penetrasi DG} = \frac{\text{Total DG Penetration}}{\text{Total Generation}} \times 100\% \quad (44)$$

Tabel 3.5 Skenario Level Pembangkitan DG

Sistem Kelistrikan	Jumlah DG	Penetrasi DG
Penyulang Koto Nan 4	1 Unit	45 %
		32%
	2 Unit	45%
		32%

Sementara itu,DG yang akan dipasang memiliki kelebihan dan kekurangan diantaranya :

Tabel 3.6 Kelebihan dan Kekurangan Generator Diesel

Kelebihan dan Kekurangan Generator Diesel	
Kelebihan	Kekurangan
Sebagai bahan bakar, diesel merupakan bahan bakar paling murah daripada cairan karbonat hidro lainnya. Bisa menghemat 28-30% biaya yang akan dikeluarkan	Generator diesel mengeluarkan suara gemuruh ketika dinyalakan atau di gunakan
Mampu menjadi sumber utama listrik. Karena daya yang dihasilkan bisa dari 15kW-2000kW	Generator diesel sedikit susah untuk di nyalakan dan membutuhkan waktu untuk menyalakanya, khususnya ketika generator diesel dalam keadaan dingin.
Biaya pemeliharaan generator diesel relatif lebih murah daripada generator bensin	Tidak di semua area di perbolehkan menggunakan generator diesel.
Generator diesel ini juga cukup tahan lama dibandingkan dengan generator bensin dan pembangkit listrik lainnya	Instalasi membutuhkan biaya yang lebih tinggi dibandingkan generator lainnya.

Tabel 3.5 Kelebihan dan Kekurangan Generator Diesel (lanjutan)

Kelebihan	Kekurangan
Konsumsi bahan bakar generator diesel jauh lebih sedikit dari jenis generator lainnya	Biaya perawatan jauh lebih tinggi dibandingkan generator lainnya
Bahan bakar lebih mudah didapat	

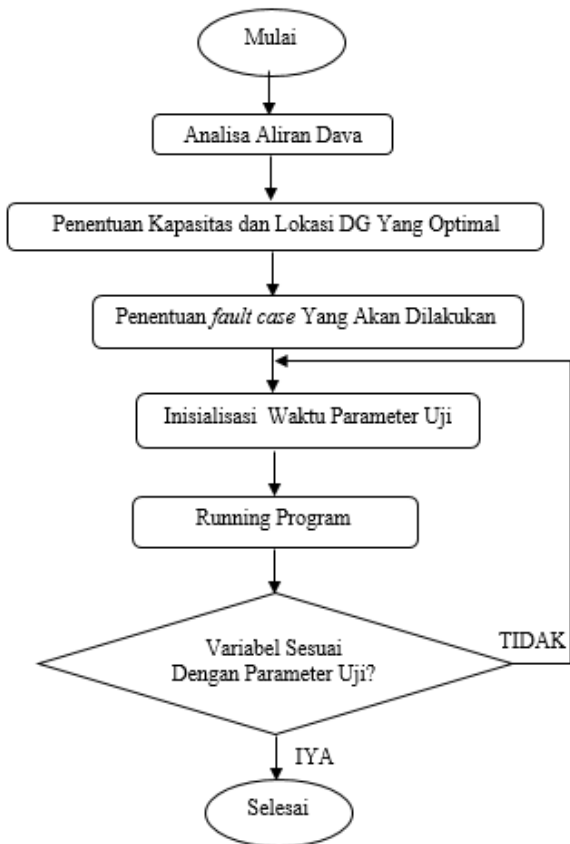
Sedangkan pada DG yang kedua yaitu *PhotoVoltaic* juga memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan akan dijelaskan pada tabel 3.6

Tabel 3.7 Kelebihan dan Kekurangan *PhotoVoltaic*

Kelebihan dan Kekurangan <i>PhotoVoltaic</i>	
Kelebihan	Kekurangan
PV sangat ramah lingkungan dan tidak memberikan kontribusi terhadap perubahan iklim.	Harganya relatif mahal meskipun telah mengalami banyak penurunan harga.
Memanfaatkan energi matahari yang energi tersebut berlimpah ruah di planet kita.	Masih perlu meningkatkan efisiensi karena banyak sinar matahari yang terbuang sia-sia.
Mudah dipasang dan pemeliharaan yang sangat rendah.	Jika tidak terpasang dengan baik dapat terjadi overheating pada panel.
Panel surya tidak kehilangan banyak efisiensi dalam masa pakai mencapai 20+tahun.	Sifatnya intermittent yang dimana sinar matahari hanya didapat pada siang hari saja.
Masa pakainya cukup lama yaitu antara 25-30 tahun.	PV terbuat dari beberapa bahan yang tidak ramah lingkungan

3.3 Diagram Alir Simulasi Kestabilan Sudut Rotor Penyulang Koto Nan 4

Pada kestabilan sudut rotor, akan dilakukan dengan simulasi dengan menggunakan software matlab. Berikut adalah flowchart dari simulasi.



Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi kestabilan Sudut Rotor

Penjelasan diagram alir dari simulasi tugas akhir ini yaitu :

1. Awal mulanya yaitu kita melakukan analisa aliran daya yang dihasilkan dari simulasi aliran daya. Kita melihat variabel dari tegangan dalam p.u.
2. Setelah melihat tegangan yang didapatkan dari analisa aliran daya, kita melakukan penetapan dari kapasitas dan lokasi pemasangan DG. Kapasitas ditetapkan dari persentasi kebutuhan beban yang dibutuhkan sedangkan penetapan lokasi DG dilakukan dengan perhitungan analitik yaitu dengan perhitungan TP_{Loss} .
3. Langkah ketiga yaitu penetapan *fault case* dari simulasi tersebut. Penetapan *fault case* ini sendiri agar kita bisa mengamati kestabilan sudut rotor ketika terjadi *fault*.
4. Setelah memilih *fault case* yang akan disimulasikan, kita memberikan inisialisasi waktu parameter uji. Waktu itu bertujuan melihat grafik yang dihasilkan ketika terjadi *fault* terjadi dimana waktu stabil menuju tidak stabil.
5. Setelah running program, apabila inisialisasi waktu parameter sesuai dengan grafik yang diinginkan, maka kita bisa menganalisa dari hasil grafik yang dihasilkan.

Untuk analisa stabilitas transien, sistem yang digunakan harus memenuhi kondisi berikut ini :

- a) Sistem setidaknya terhubung dengan 2 generator sinkron.
- b) Sistem tidak terhubung dengan infinite bus.
- c) Selama simulasi suplai daya dianggap tetap.
- d) Mengabaikan pengaruh governor dan daya asinkron (damping).
- e) Menggunakan simulasi Center of Inertia (COI).

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Pemodelan Simulasi Sistem Kelistrikan PLN Payakumbuh

Pada pemodelan dari sistem kelistrikan ini, dilakukan simulasi yang dimodelkan dengan *software* Matlab R2014a. Data yang digambarkan pada simulasi merupakan data yang real di lapangan dan ditambahkan dengan data asumsi. Pada pengerjaan tugas akhir ini digambarkan data dari feeder Koto Nan 4 jaringan distribusi kota Payakumbuh yang *single line diagram* distribusi radial yang dimana jaringan ini terhubung dengan PLN GH Payakumbuh. Sistem dari penyulang Koto Nan 4 ditambahkan dua unit DG yang kapasitasnya berdasarkan dari persentase beban yang dibutuhkan. DG yang digunakan yaitu generator diesel dan photovoltaic. Pembangkitan yang akan dilakukan tidak akan melebihi 50% kebutuhan beban. Jadi, suplai dari grid ke beban akan tetap lebih besar dibandingkan dengan suplai dari generator ke beban. Selanjutnya dilakukan simulasi dengan menentukan lokasi dari pemasangan DG dan kapasitas dari DG yang akan dipasang. Lalu, dilakukan simulasi dengan menggunakan metode *critical trajectory* yang dimana dilihat:

1. Analisa pemasangan satu generator diesel
2. Analisa pemasangan generator diesel dan photovoltaic

Sedangkan pada simulasi yang dilakukan akan menggunakan beberapa *case* agar bisa dianalisa. *Case* tersebut yaitu diberikan gangguan pada bus tertentu dan bus yang berada di atas bus yang terkena gangguan akan di *open*. Berikut adalah *case* yang akan dilakukan yaitu :

- | | | |
|-----------|--------------|------------|
| 1. CASE A | : BusLG = 29 | BusOP = 28 |
| 2. CASE B | : BusLG = 28 | BusOP = 27 |
| 3. CASE C | : BusLG = 20 | BusOP = 19 |
| 4. CASE D | : BusLG = 15 | BusOP = 14 |
| 5. CASE E | : BusLG = 21 | BusOP = 20 |

4.2 Penentuan Lokasi DG

Berdasarkan rumus yang sudah dijelaskan sebelumnya, pemasangan DG berkaitan dengan TPLoss dari sistem kelistrikan. Dengan mengurutkan TPLoss dari yang terkecil sampai yang terbesar dapat menentukan lokasi pemasangan DG. Pemasangan dari DG adalah pada bus TPLoss minimum. Berikut adalah tabel TPLoss jaringan distribusi Kota Payakumbuh Penyulang Koto Nan 4 :

Tabel 4.1 Prioritas Pemasangan DG 45%

HASIL SIMULASI LOKASI PENENTUAN DG 45%					
Bus Kandidat	Rugi Daya Apabila Terhubung 1 DG 45%	Peringkat Bus	Bus Kandidat	Rugi Daya Apabila Terhubung 2 DG 45%	Peringkat Bus
2	11815,05483	2	2	8643,492312	3
3	13410,49306	3	3	9729,153466	6
4	14085,93134	4	4	9801,338208	8
5	14736,22355	5	5	9848,401718	10
6	15317,46929	6	14	9687,027396	5
7	15849,50124	7	15	9769,103546	7
8	16361,97902	8	16	9839,081224	9
9	16780,21553	9	30	8941,632175	4
10	17403,92252	10	31	5542,48207	1
32	8178,672499	1	32	8178,672499	2

Dengan memperhitungkan nilai TPLoss diatas, didapatkan beberapa nilai dari TPLoss bus 1 sampai bus 32. Lalu dilakukan pengurutan dari TPLoss minimum ke maksimum. Dengan begitu, pemasangan DG pertama yaitu terletak pada bus 32.

Pemasangan DG kedua juga tergantung bagaimana analisa TPLoss setelah pemasangan DG pertama. Kita asumsikan DG pertama diberi nilai sebesar 45% dari kapasitas beban. Nilai yang diberikan yaitu sebesar 2.0808 MW dan 1.0961MVAR. Lalu hasil TPLoss pemasangan DG 32% yang dihasilkan sebagai berikut :

Tabel 4.2 Prioritas Pemasangan DG 32%

HASIL SIMULASI LOKASI PENENTUAN DG 32%					
Bus Kandidat	Rugi Daya Apabila Terhubung 1 DG 32%	Peringkat Bus	Bus Kandidat	Rugi Daya Apabila Terhubung 2 DG 32%	Peringkat Bus
2	14874,31138	2	14	13800,79981	6
3	16628,65417	3	15	13830,51685	7
4	16944,67696	4	16	13848,13003	10
5	17235,50243	5	17	13847,45491	9
6	17457,14072	6	20	13843,244	8
7	17629,4647	7	21	13748,83326	5
8	17782,19475	9	29	13424,1506	4
9	17840,49157	10	30	11673,91802	3
14	17663,05056	8	31	9227,200027	1
32	9355,631804	1	32	9355,631804	2

Pada simulasi lokasi pemasangan DG yang akan dipasang masih tetap sama pada bus 32 dan 31.

4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Sudut Rotor

Pada simulasi kestabilan sudut rotor ini, hasil yang diperhatikan pada simulasi ini adalah waktu pemutus kritis (CCT), respon sudut rotor dan trajektori dari generator. Hasil tersebut dapat berbeda-beda, hal tersebut tergantung dari jumlah, kombinasi jenis dan persentase pembangkitan daya aktif DG yang terkoneksi dengan sistem kelistrikan. Pada sub bab ini terbagi menjadi 2 bagian hasil simulasi, yaitu ketika terhubung 1 unit DG dan 2 unit DG.

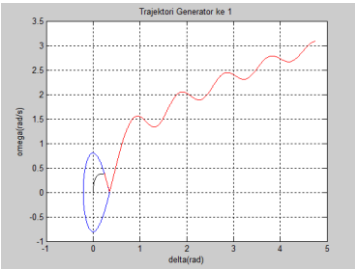
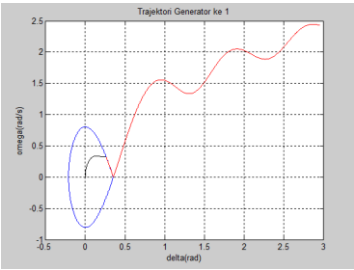
4.3.1 Terhubung dengan 1 DG

Pada skenario simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan 1 unit DG pada sistem kelistrikan penyulang Koto Nan 4 bus di bus 32 yang letaknya telah dioptimasi pada sub bab sebelumnya. Besar persentase

suplai daya aktif dan reaktif dari DG dibagi menjadi dua, yaitu sebesar 45% dan 32%. Hasil simulasi waktu pemutus kritis yang didapatkan dari program metode simulasi numerik berbasis critical trajectory dapat dilihat pada tabel 4.2

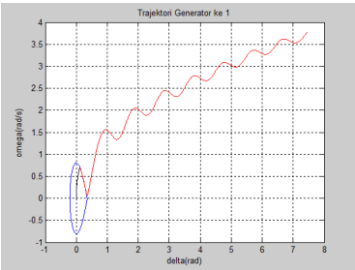
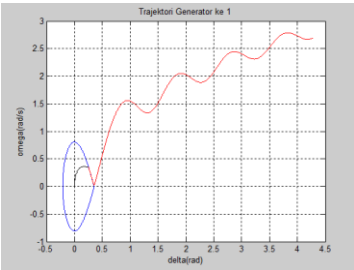
Tabel 4.3 Hasil CCT dengan pemasangan 1 DG

CASE	BUS 3LG	BUS3OP	t clearing		t clearing 1	
			1 DG 45%	1 DG 32%	1 DG 45%	1 DG 32%
A	29	28	1,095	1,094	1,096	1,095
B	28	27	0,959	0,959	0,96	0,96
C	20	19	1,026	1,025	1,027	1,026
D	15	14	0,34	0,34	0,341	0,341
E	21	20	1,335	1,331	1,336	1,332



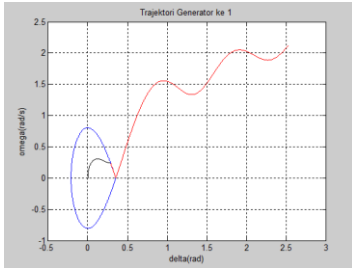
Gambar 4.1 Trajektori Generator 1 Case A 45%

Gambar 4.2 Trajektori Generator 1 Case B 45%

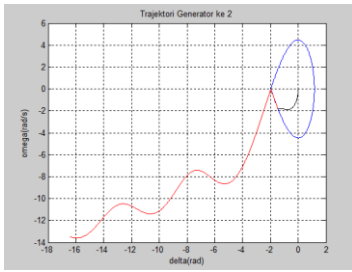


Gambar 4.3 Trajektori Generator 1 Case C 45%

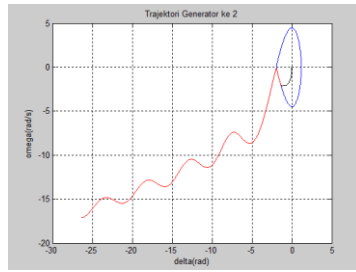
Gambar 4.4 Trajektori Generator 1 Case D 45%



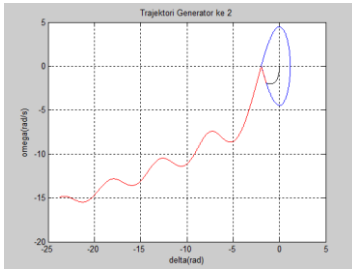
Gambar 4.5 Trajektori Generator 1 Case E 45%



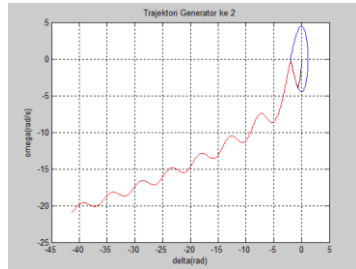
Gambar 4.6 Trajektori Generator 2 Case A 45%



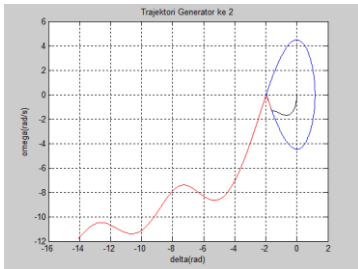
Gambar 4.7 Trajektori Generator 1 Case B 45%



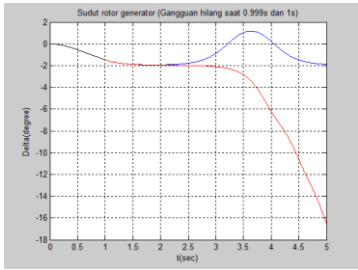
Gambar 4.8 Trajektori Generator 2 Case C 45%



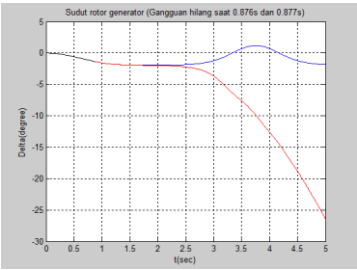
Gambar 4.9 Trajektori Generator 2 Case D 45%



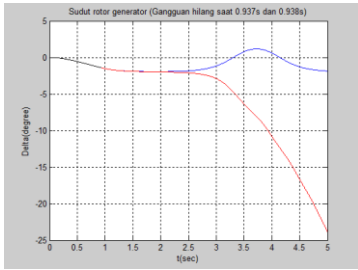
Gambar 4.10 Trajektori Generator 2 Case E 45%



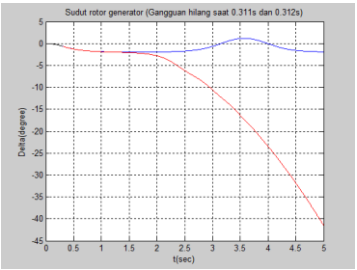
Gambar 4.11 Sudut Rotor Generator Case A 45%



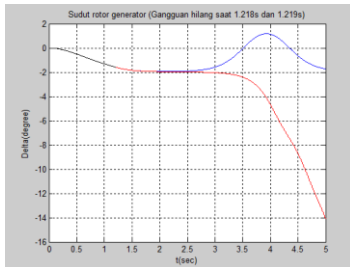
Gambar 4.12 Sudut Rotor Generator Case B 45%



Gambar 4.13 Sudut Rotor Generator Case D 45%

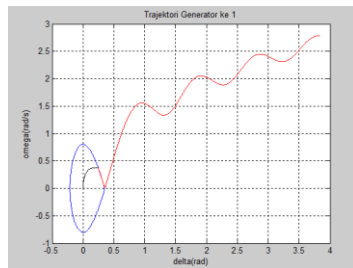
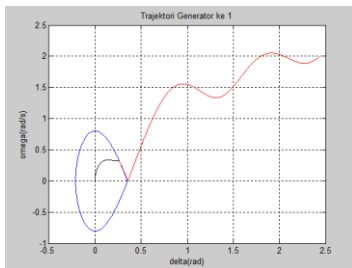


Gambar 4.14 Sudut Rotor Generator Case E 45%

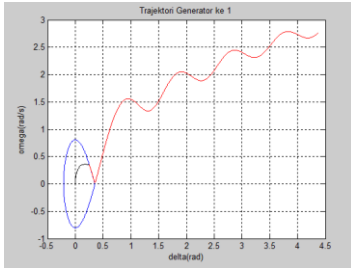


Gambar 4.15 Sudut Rotor Generator Case E 45%

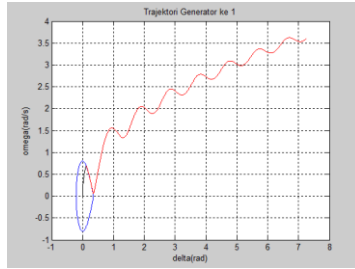
Pada hasil simulasi yang dilakukan pada gambar 4.1 sampai dengan 4.5 adalah hasil dari generator pusat. Pada gambar tersebut bisa dilihat pada garis biru adalah dimana generator dapat mempertahankan sinkronisasinya. Sedangkan pada grafik diatas garis yang berwarna merah adalah garis dimana generator kehilangan sinkronisasi nya. Pada gambar 4.6 sampai dengan 4.10 adalah gambar dari generator diesel yang dipasang. Generator diesel yang dipasang ini mempunyai suplai 45% dari kapasitas beban yang dibangkitkan. Gambar yang dihasilkan juga sama. Lalu, pada gambar 4.10 sampai dengan 4.15 adalah gambar dari respon sudut rotor dari generator. Pada garis yang biru adalah dimana generator masih dalam keadaan stabil dan terjadi perpotongan dengan garis yang merah. Maka itulah yang dapat dikatakan waktu kliring kritis (CCT). Sedangkan pada gambar CCT juga sama terdapat merah dan biru yang menandakan sistem dalam keadaan stabil dan tidak stabil.



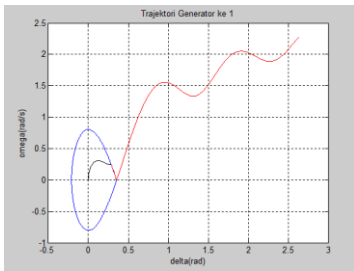
Gambar 4.16 Trajektori Generator 1 Case A 32% Gambar 4.17 Trajektori Generator 1 Case B 32%



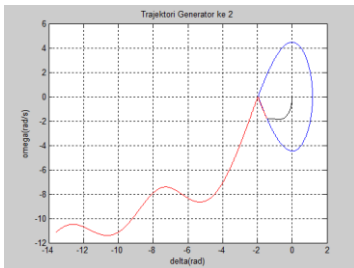
Gambar 4.18 Trajektori Generator 1 Case C 32%



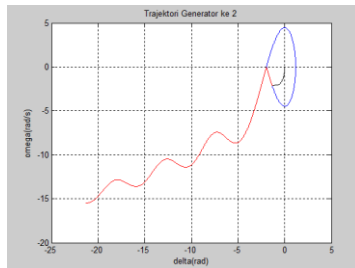
Gambar 4.19 Trajektori Generator 1 Case D 32%



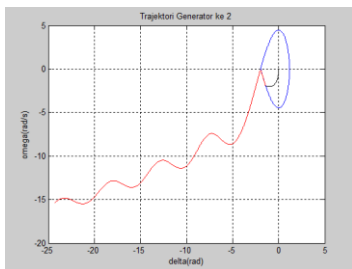
Gambar 4.20 Trajektori Generator 1 Case E 32%



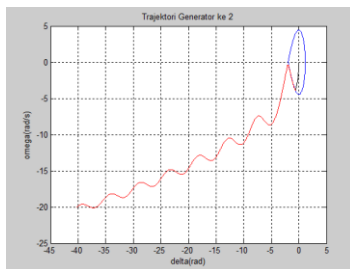
Gambar 4.21 Trajektori Generator 2 Case A 32%



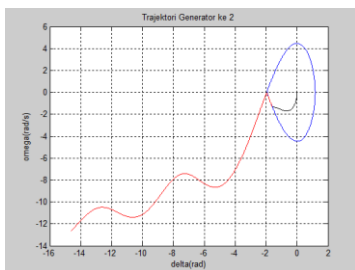
Gambar 4.22 Trajektori Generator 2 Case B 32%



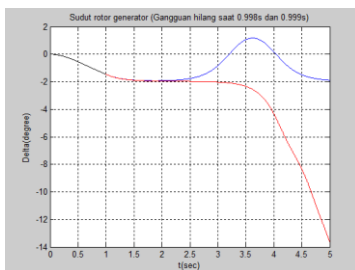
Gambar 4.23 Trajektori Generator 2 Case C 32%



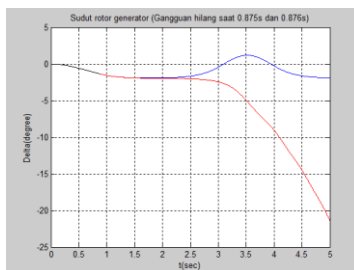
Gambar 4.24 Trajektori Generator 2 Case D 32%



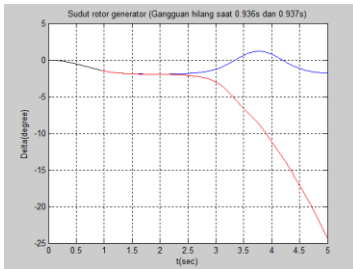
Gambar 4.25 Trajektori Generator 2 Case E 32%



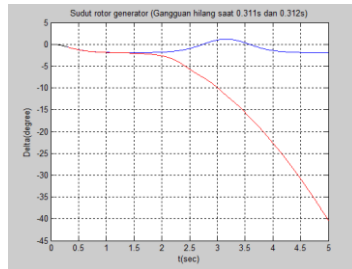
Gambar 4.26 Sudut Rotor Generator Case A 32%



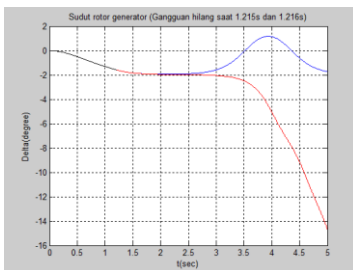
Gambar 4.27 Sudut Rotor Generator Case B 32%



Gambar 4.28 Sudut Rotor Generator Case C 32%



Gambar 4.29 Sudut Rotor Generator Case D 32%



Gambar 4.30 Sudut Rotor Generator Case E 32%

Pada hasil simulasi, dilakukan pemasangan DG pada simulasi ini sebesar 32%. DG yang dipasang juga generator diesel. Hasil simulasi yang didapatkan tidak jauh berbeda dengan pemasangan DG 45%. Waktu kliring kritis yang dilakukan pada kali ini sama yaitu 0,001. Pada gambar 4.16 sampai dengan 4.20 merupakan generator pusat dari suplai PLN. Sedangkan pada gambar 4.21 sampai dengan gambar 4.30 yaitu hasil grafik yang dihasilkan pada generator 2 yaitu DG dan hasil sudut rotor generator.

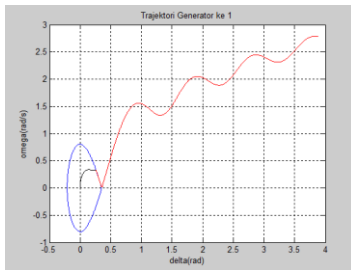
4.3.2 Terhubung dengan 2 DG

Pada skenario pemasangan dengan menggunakan 2 DG yaitu dengan melihat hasil dari grafik yang sama yaitu waktu kliring kritis (CCT). Pada skenario yang kedua ini juga dilakukan dengan suplai dari DG sebesar 45% dan 32%. Sedangkan lokasi pemasangan dari DG ini sendiri yaitu pada bus 31. Pada bus 31, akan dipasang DG Photovoltaic yang dimana hanya menyuplai daya aktif saja. Hasil simulasi waktu

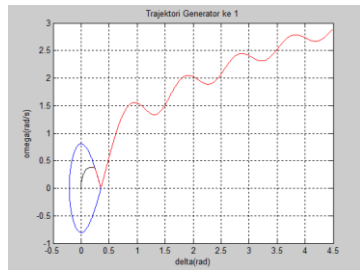
pemutus kritis yang didapatkan dari program metode simulasi numerik berbasis critical trajectory dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4.4 Hasil CCT dengan pemasangan 2 DG

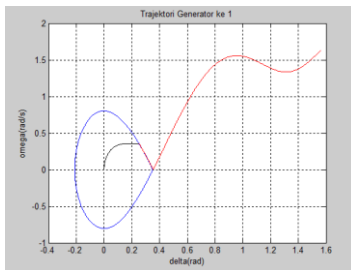
CASE	BUS 3LG	BUS3OP	t clearing		t clearing 1	
			2 DG 45%	2 DG 32%	2 DG 45%	2 DG 32%
A	29	28	1,093	1,093	1,094	1,094
B	28	27	0,959	0,958	0,96	0,959
C	20	19	1,025	1,025	1,026	1,026
D	15	14	0,34	0,341	0,341	0,342
E	21	20	1,333	1,33	1,334	1,334



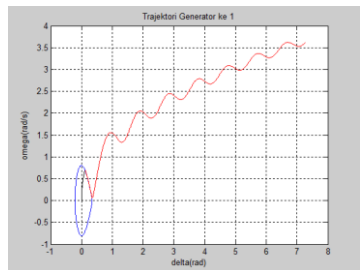
Gambar 4.31 Trajektori Generator 1 Case A 45% 2 DG



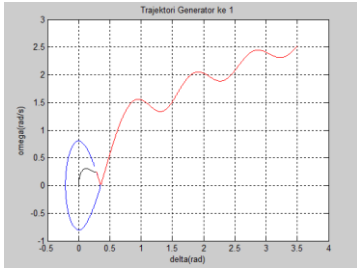
Gambar 4.32 Trajektori Generator 1 Case B 45% 2 DG



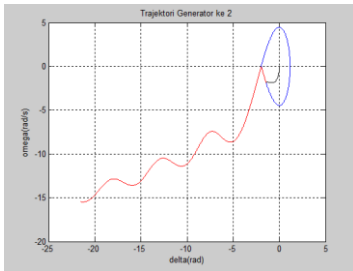
Gambar 4.33 Trajektori Generator 1 Case C 45% 2 DG



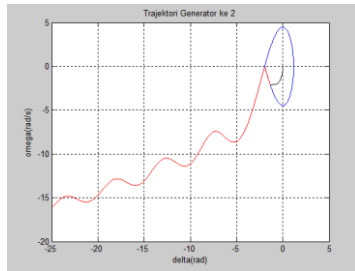
Gambar 4.34 Trajektori Generator 1 Case D 45% 2 DG



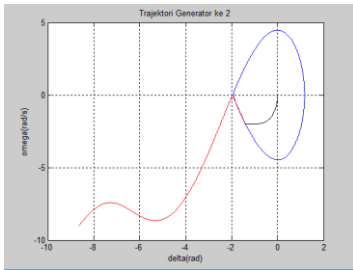
Gambar 4.35 Trajektori Generator 1 Case E 45% 2 DG



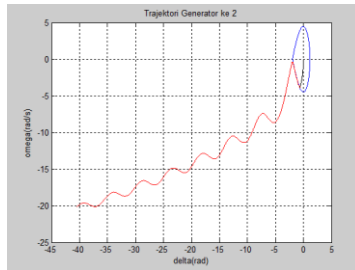
Gambar 4.36 Trajektori Generator 2 Case A 45% 2 DG



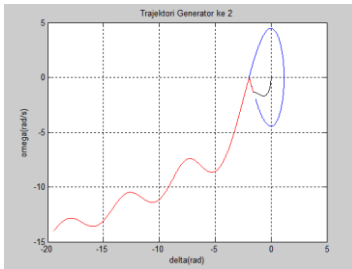
Gambar 4.37 Trajektori Generator 2 Case B 45% 2 DG



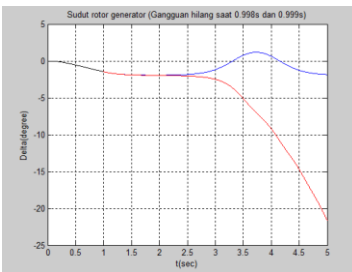
Gambar 4.38 Trajektori Generator 2 Case C 45% 2 DG



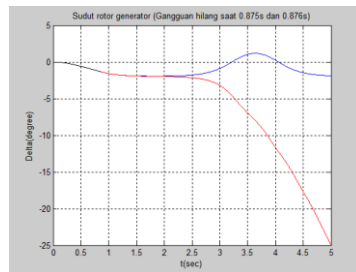
Gambar 4.39 Trajektori Generator 2 Case D 45% 2 DG



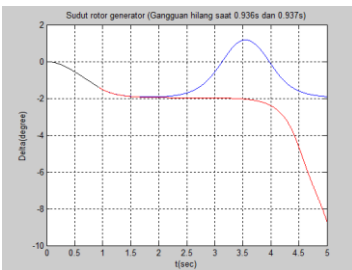
Gambar 4.40 Trajektori Generator 2 Case E 45% 2 DG



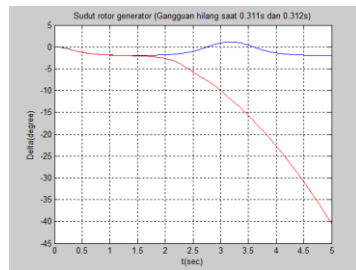
Gambar 4.41 Sudut Rotor Generator Case A 45% 2 DG



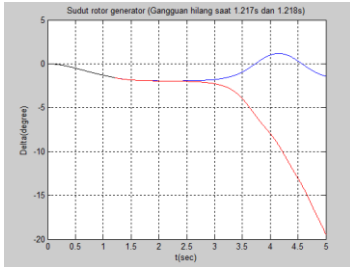
Gambar 4.42 Sudut Rotor Generator Case B 45% 2 DG



Gambar 4.43 Sudut Rotor Generator Case C 45% 2 DG

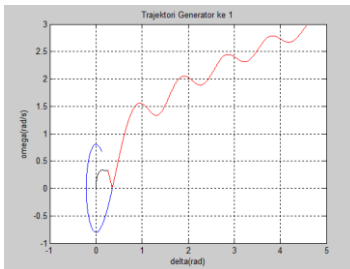


Gambar 4.44 Sudut Rotor Generator Case D 45% 2 DG

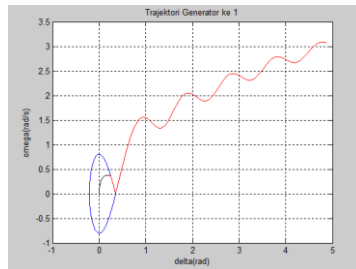


Gambar 4.45 Sudut Rotor Generator Case D 45% 2 DG

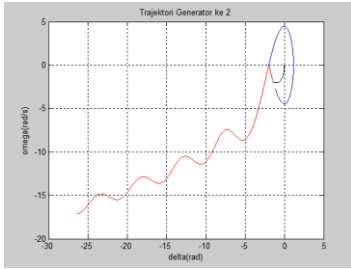
Pada simulasi menggunakan 2 DG ini dapat dilihat pada grafik yang dihasilkan pada gambar 4.31 sampai dengan gambar 4.45. Pada grafik tersebut dilihat hasil dari trajektori generator 1 sebagai generator utama atau suplai PLN dan generator 2 sebagai generator diesel. Grafik diatas menggunakan penggunaan DG dengan suplai 45%. Serta penggunaan photovoltaic tidak dikatakan generator 3 dikarenakan photovoltaic hanya mensuplai daya aktif saja. Dan pada program yang digunakan pada pengerjaan tugas ini menggunakan mesin sinkron. Oleh karena itu terlihat pada penggunaan 2 DG waktu kliring kritis yang dihasilkan lebih cepat dibanding menggunakan 1 DG. Sementara penjelasan pada 2 DG dengan suplai 32% akan dibahas pada grafik dibawah berikut ini.



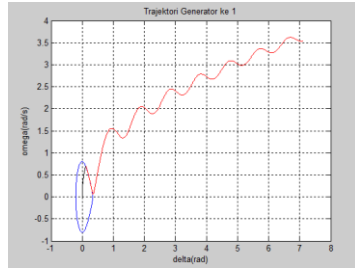
Gambar 4.46 Trajektori Generator 1 Case A 32% 2 DG



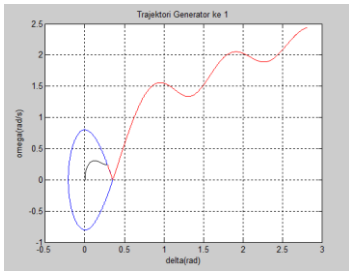
Gambar 4.47 Trajektori Generator 1 Case B 32% 2 DG



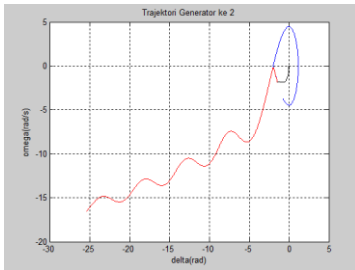
Gambar 4.48 Trajektori Generator 1 Case C 32% 2 DG



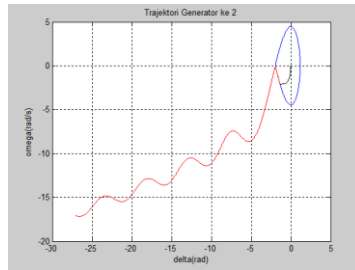
Gambar 4.49 Trajektori Generator 1 Case D 32% 2 DG



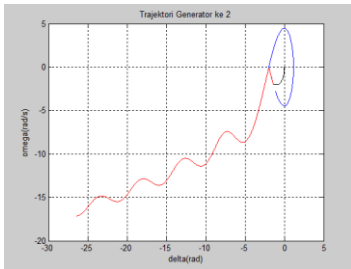
Gambar 4.50 Trajektori Generator 1 Case E 32% 2 DG



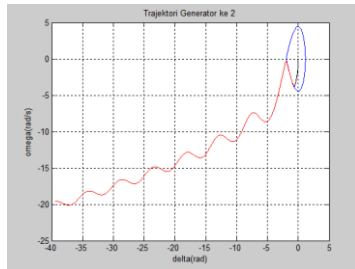
Gambar 4.51 Trajektori Generator 2 Case A 32% 2 DG



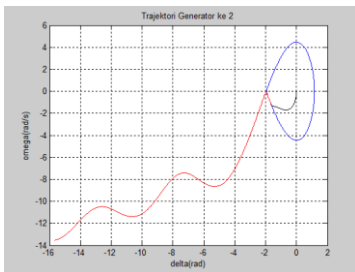
Gambar 4.52 Trajektori Generator 2 Case B 32% 2 DG



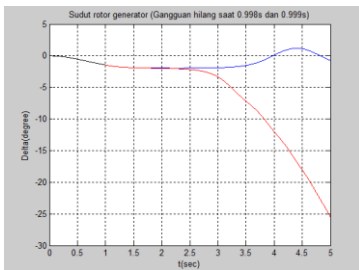
Gambar 4.53 Trajektori Generator 2 Case C 32% 2 DG



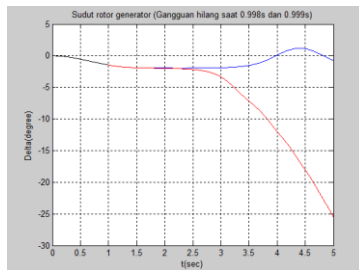
Gambar 4.54 Trajektori Generator 2 Case D 32% 2 DG



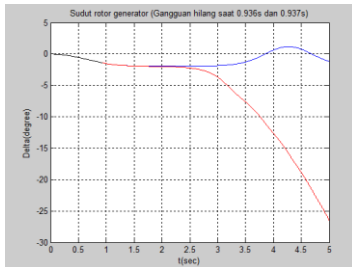
Gambar 4.55 Trajektori Generator 2 Case E 32% 2 DG



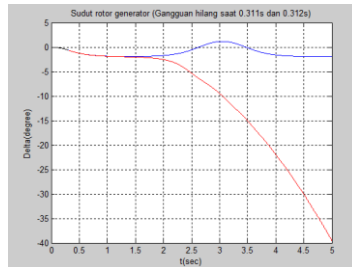
Gambar 4.56 Sudut Rotor Generator Case A 32% 2 DG



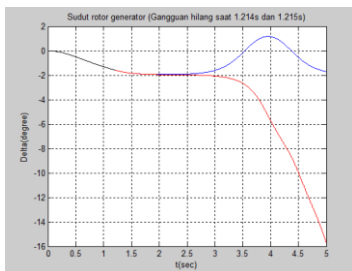
Gambar 4.57 Sudut Rotor Generator Case B 32% 2 DG



Gambar 4.58 Sudut Rotor Generator Case C 32% 2 DG



Gambar 4.59 Sudut Rotor Generator Case D 32% 2 DG



Gambar 4.60 Sudut Rotor Generator Case E 32% 2 DG

Hasil dari gambar diatas merupakan hasil dari pemasangan 2 DG dengan kapasitas suplai yaitu 32%. Pada gambar 4.46 sampai dengan 4.50 merupakan dari trajektori generator dimana generator bisa mempertahankan sinkronisasinya terhadap gangguan. Sementara 4.51 sampai dengan 4.60 adalah dimana trajektori generator dan hasil dari sudut rotor generator dimana bisa dilihat perpotongan garis dari kondisi generator pada saat stabil menuju tidak stabil.

Pada pemasangan DG,memiliki beberapa keuntungan yaitu salah satunya mengurangi rugi daya dari sistem kelistrikan. Hal itu bisa dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.5 Pengaruh DG Terhadap Rugi Daya

Pengaruh DG terhadap Rugi Daya			
Tanpa DG	Rugi daya sebelum pemasangan DG	Daya Aktif	16103.4 Watt
		Daya Reaktif	14481.6 VAR
Suplai 45%	Rugi Daya Pemasangan 1 DG Pada Bus 32	Daya Aktif	5871.4592 Watt
		Daya Reaktif	5280.7083 VAR
Suplai 45%	Rugi Daya Pemasangan 2 DG Pada Bus 32 dan 31	Daya Aktif	4338.4145 Watt
		Daya Reaktif	3901.9153 VAR
Suplai 32%	Rugi Daya Pemasangan 1 DG Pada Bus 32	Daya Aktif	6565.6094 Watt
		Daya Reaktif	5905.0388 VAR
Suplai 32%	Rugi Daya Pemasangan 2 DG Pada Bus 32 dan 31	Daya Aktif	6340.0148 Watt
		Daya Reaktif	5702.1522 VAR

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai kestabilan transien yang melihat parameter sudut rotor yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, dapat ditarik kesimpulan :

1. Sebelum kita menempatkan DG pada sistem, kita harus menganalisa terlebih dahulu aliran daya agar bisa menentukan lokasi penempatan DG.
2. Penentuan lokasi DG dapat dihitung dengan cara mengurutkan TPLoss dari yang terkecil sampai terbesar. Apabila mendapatkan bus yang terkecil.
3. Pada sistem penyulang Koto Nan 4 setelah dilakukan perhitungan dari total rugi daya didapatkan penempatan DG yaitu pada bus 32 dan bus 31.
4. Dalam penempatan dan pemodelan kapasitas dari DG tidak boleh lebih besar dari suplai grid. Dan harus dihindari fenomena *reverse power* dikarenakan akibat dari fenomena tersebut dapat mengakibatkan kenaikan total rugi daya dari sistem.
5. Pembangkitan dari suplai DG yang akan dipasang yaitu sebesar 45% dan 32%
6. Hasil dari waktu pemutus kritis (CCT), didapatkan hasil dimana CCT dari 2 DG lebih cepat range 0,001-0,003 second dibandingkan dengan 1 DG.
7. Setelah diberikan gangguan pada bus tertentu, generator diesel mengalami perlambatan akibat terjadinya hubung singkat yang diberikan.
8. Perubahan dari asumsi inertia dan reaktansi transien akan mempengaruhi kecepatan putar dan sudut rotor. Sehingga waktu CCT bisa lebih cepat atau lebih lambat.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya mengenai judul tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu dikembangkan jenis DG yang lain agar bisa menganalisa apabila menggunakan jenis DG yang lain.
2. Perlu dikembangkan dengan pengaruh governor dan efek damping.
3. Diperlukan pengembangan terkait pemodelan infinite bus.
4. Diperlukan perbandingan antara waktu pemutus kritis dari metode simulasi numerik berbasis *critical trajectory* dengan *direct method critical trajectory* untuk validitas metode.
5. Perlu dianalisa kestabilan sudut rotor pada feeder lain dari jaringan distribusi kota Payakumbuh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Ananthapadmanabha, A. D. Kulkarni, ManojKumar Pujar, H. Pradeep, dan S. Chetan, “Rotor angle stability analysis of a distributed generator,” *T Httpwwwacademicjournalsorgjeeer*, vol. Vol. 2(5), Nov 2010.
- [2] Agam Rido Priawan, Ir. Mahfudz Shidiq, M.T. ², dan Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D, “ANALISIS STABILITAS TRANSIENT SISTEM TENAGA LISTRIK PADA PT. KEBON AGUNG MALANG,” 2014, vol. VOL 2, NO 6.
- [3] Rory Campbel, “Fact Sheet About Distributed Generation,” 2012.
- [4] T. Ackermann, G. Anderson, dan L. Soder, “Distributed Generation : a definition,” *ZurichElectric Power Syst. Res.*
- [5] H. Saadat, *Power system analysis*. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1999.
- [6] P.Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education, 1994.
- [7] F. Filiana, A. Priyadi, M. H. Purnomo, dan N. Yorino, “Critical trajectory method for calculating CCT considering radial and single circuit systems,” 2017, hlm. 81–86.
- [8] Ahmad Febri Firmansah, Ontoseno Penangsang, dan Dimas Fajar Uman Putra, “Penentuan Lokasi dan Ukuran Optimal Distributed Generation (DG) menggunakan Metode Analitis pada Jaringan Distribusi Radial dengan Mempertimbangkan Rugi – Rugi Jaringan Daya Listrik dan Profil Tegangan Berbasis Geographic Information System (GIS),” 2017.
- [9] Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng., *Critical Trajectory for Transient Stability Analysis*. .
- [10] F. Arfanizar, P. Ardyono, dan Soedibyo, “Analisis Stabilitas Transien dan Tegangan pada Sistem Tenaga Listrik akibat Instalasi Pembangkitan Terdistribusi,” *J. Tek. ITS*

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Andika Bagaskara atau yang biasa dipanggil dika merupakan seorang putra Minangkabau yang lahir di Padang, tanggal 1 Juli 1996. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Selama di bangku perkuliahan, penulis sudah melakukan berbagai macam kegiatan guna mengembangkan diri. Penulis sudah mengikuti berbagai macam organisasi diantaranya pernah menjadi staff Kementrian Dalam Negri Badan Eksekutif Mahasiswa ITS ketika berada di tahun kedua perkuliahan. Penulis juga aktif dalam organisasi forum daerah dan menjabat sebagai ketua IMAMI (Ikattan Mahasiswa Minang) se Surabaya. Disamping organisasi, penulis juga mengikuti berbagai macam pelatihan akademik. Pada tahun 2017, penulis berkesempatan mengikuti kerja praktek di PT.RAPP (Riau Andalan Pulp and Paper) di Pangkalan Kerinci Riau sebagai Electrical Maintenance. Harapannya pembuatan tugas akhir ini dapat memajukan keilmuan di dalam dunia elektro dan penulis berharap dapat mendapatkan kritik dan saran guna menyempurnakan keilmiahan yang telah dikerjakan.

Dhikabhagas01@gmail.com